



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**STUDIUM UTVÁŘENÍ MAZACÍHO FILMU  
TEXTUROVANÝCH KONFORMNÍCH KONTAKTŮ**

STUDY OF LUBRICANT FILM FORMATION IN TEXTURED CONFORMAL CONTACTS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Ladislav Plachý**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Milan Omasta, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Ladislav Plachý**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Milan Omasta, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Studium utváření mazacího filmu texturovaných konformních kontaktů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Optická interferometrie je efektivní metoda pro studium tloušťky mazacího filmu v nekonformních kontaktech. V posledních letech jsou zřejmé snahy o její aplikaci i na kontakty konformní, zejména ve spojení s texturovanými povrchy. U nich může nová metoda přispět k pochopení mechanismů, které ovlivňují utváření mazacího filmu.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je popsat mechanismy, které ovlivňují utváření mazacího filmu u texturovaných konformních kontaktů. Pro účely studie bude implementována optická pozorovací metoda na tribometr typu pin-on-disc.

Dílčí cíle diplomové práce:

- navrhnout a realizovat implementaci metody optické interferometrie na tribometr typu pin-on-disc,
- na základě studia vědeckých článků identifikovat výzkumný problém a navrhnout výzkumné hypotézy,
- navrhnout a realizovat texturovaný povrch,
- realizovat a vyhodnotit sérii experimentů,
- připravit publikaci výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam literatury:**

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 07-506-7836-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

---

## ABSTRAKT

Cílem této práce je popsání mechanismů, které ovlivňují utváření mazacího filmu u texturovaných konformních kontaktů. Pro pozorování formování mazacího filmu je na tribometru typu *pin-on-disc* implementována metoda optické interferometrie. To umožňuje zkoumání vlivu textury na tloušťku mazacího filmu a koeficient tření vzorků s různými parametry textury. Na základě vlivu těchto parametrů a vizuálním obrazu kontaktu je popsán průběh maziva kontaktem. Mělké důlky zvyšují tloušťku mazacího filmu v elasto-hydrodynamickém mazání, kde slouží jako sekundární zdroj maziva. V hydrodynamickém mazání působí pozitivně na tloušťku mazacího filmu hluboké důlky, když s rostoucí tloušťkou filmu účinek mělkých důlků klesá. Během experimentů je pozorován vznik kavitace, která v častých případech způsobuje vyčerpání maziva z důlků a následné snížení tloušťky mazacího filmu. Tento vliv lze eliminovat vhodně zvolenými parametry textury v závislosti na provozních podmínkách součástí.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Texturování povrchu, utváření mazacího filmu, konformní kontakt, optická interferometrie

## ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to describe mechanisms involved in a lubricant film formation in textured conformal contacts. For exploring of the lubricant film formation, the method of optical interferometry is implemented on a pin-on-disc tribometer. That allows to study an influence of a texture on lubricant film thickness and coefficient of friction of textured samples. These samples have different parameters of a texture. On the basis of these effects and the visual image of the contact, the flow of lubricant in the contact area is described. Shallow dimples lead to larger film thickness in elasto-hydrodynamic lubrication regime. They act like a lubricant reservoir. Deep dimples positively affect film thickness in hydrodynamic lubrication regime, where the effect of shallow dimples descend. During experiments, the formation of a cavitation is observed. The cavitation causes a starvation of dimples in many cases. This leads to reducing of the lubricant film thickness. This effect can be eliminated by appropriate parameters of texture in operational conditions of elements.

## KEY WORDS

Surface texturing, lubrication film formation, conformal contact, optical interferometry

---



---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

---

PLACHÝ, L. *Studium utváření mazacího filmu texturovaných konformních kontaktů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.

---





---

## PODĚKOVÁNÍ

---

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Milanu Omastovi, Ph.D. za ochotu, rady i připomínky, které mi pomohly při vypracování této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat všem, kteří přispěli radou, či výrobou jednotlivých komponent zařízení a především svým nejbližším za podporu a pochopení po celou dobu mých studií.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

---

Prohlašuji, že jsem tuto práci: *Studium utváření mazacího filmu texturovaných konformních kontaktů* vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Milana Omasty, Ph.D. a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47 b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Vysoké učení technické v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

V Brně dne 19. května 2017

---

Bc. Ladislav Plachý

---



**OBSAH**

---

<b>OBSAH</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1 Režimy mazání	14
2.2 Kapalinové mazání	15
2.2.1 Režimy kapalinového mazání	15
2.2.2 Bezrozměrné parametry a mapa režimů	16
2.3 Mazání texturovaných ploch	17
2.3.1 Texturování	17
2.3.2 Vlastnosti textur	17
2.3.3 Výroba textur	18
2.4 Teoretické výpočtové modely	19
2.5 Experimentální studie konformních texturovaných kontaktů	20
2.6 Experimentální studie zabývající se vlastnostmi textur	25
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>28</b>
3.1 Zhodnocení poznatků z rešerše	28
3.2 Cíle diplomové práce	29
<b>4 MATERIÁL A METODY</b>	<b>30</b>
4.1 Experimentální zařízení a metodika	30
4.1.1 Popis aparatury	30
4.1.2 Přípravek pro upnutí vzorku	33
4.1.3 Mazivo	33
4.2 Kontaktní tělesa	33
4.2.1 Texturování vzorků	35
4.2.2 Experimentální vzorky	36
4.3 Typy experimentů	37
4.4 Způsob vyhodnocování	37
<b>5 VÝSLEDKY</b>	<b>39</b>
5.1 Určení režimu mazání	39
5.2 Vliv textury na koeficient tření	40
5.3 Tloušťka mazacího filmu stanovená teoreticky	42
5.4 Tloušťka mazacího filmu stanovená experimentálně	43
5.5 Porovnání teoretické a experimentální tloušťky mazacího filmu	43
5.5.1 Tloušťka mazacího filmu hladkých vzorků	43
5.6 Vliv textury na tloušťku mazacího filmu	44
5.6.1 Vliv tloušťky mazacího filmu na koeficient tření	47
5.7 Utváření mazacího filmu v texturovaném kontaktu	48
<b>6 DISKUZE</b>	<b>50</b>
6.1 Režim mazání	50
6.2 Vliv textury na koeficient tření	50
6.3 Vliv textury na tloušťku mazacího filmu	51
6.3.1 Textura s denty hlubokými 17 μm	51
6.3.2 Textura s denty hlubokými 50 μm	51
6.4 Utváření mazacího filmu v konformním texturovaném kontaktu	52
<b>7 ZÁVĚR</b>	<b>55</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>57</b>
<b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>61</b>

<b>10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>62</b>
<b>11 SEZNAM TABULEK</b>	<b>64</b>
<b>12 SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>65</b>

## 1 ÚVOD

---

**1**

Již dlouho je známo, že povrchové úpravy mohou zlepšit tribologickou výkonnost v rozsáhlém spektru aplikací. Příklady jsou vidět i v přírodě, například u ryb, které používají „texturování“ kůže ke snížení hydrodynamického odporu, čímž zvyšují účinnost svého pohybu, nebo u rostlin, které využívají tzv. „lotosový efekt“ k dosažení samočištění. Běžně se s texturovanými povrchy setkáme například při golfu, kdy důlkovaný povrch golfových míčků snižuje jejich odpor, a to pak způsobuje, že doletí až čtyřikrát dále než míčky s povrchem hladkým.

Texturování povrchu je způsob ošetření povrchu materiálu, který vede k vylepšení vlastností součásti, jako je odolnost vůči korozi, otěru, zvýšené teplotě, ale také odolnost vůči tření a opotřebení. Za tímto účelem jsou na povrchu vytvořeny výstupky nebo důlky, tzv. denty. Geometrie a rozměry povrchových textur se liší svými tvary a velikostmi od jednotek po stovky mikronů. Nejvíce prospěšné pro dosažení lepších tribologických vlastností jsou důlky ve tvaru elips. Nicméně nejrozšířenějším a nejpoužívanějším tvarem jsou kruhové důlky, které mají na zlepšení vlastností téměř totožný vliv jako elipsové důlky, navíc se snadno vyrábějí a mají nízkou výrobní cenu. Avšak používají se také denty tvarů trojúhelníkových, čtvercových, obdélníkových a šestiúhelníkových. Texturování je nejvíce efektivní ve smíšeném a mezném mazání, kde může být dosaženo snížení tření až o polovinu. V hydrodynamickém a smíšeném mazání působí negativní mikro-kavity jako zásobárna maziva, zatímco v mezném režimu mazání jako zachycovače částic opotřebení pro snížení dalšího odírání (abraze).

Tato diplomová práce se zabývá utvářením mazacího filmu v konformním kontaktu skleněného disku a texturovaného vzorku na tribometru *pin-on-disc*, přičemž test spočívá v měření koeficientu tření z třecí síly při otáčení disku a tloušťky filmu pomocí optické interferometrie.

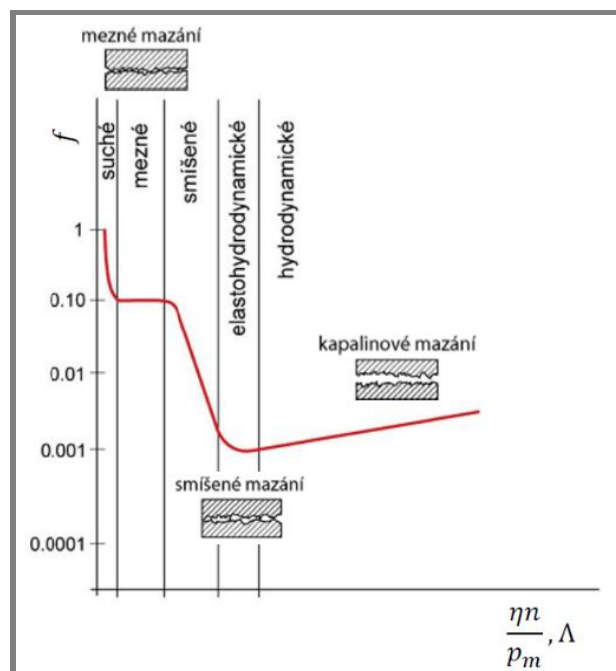
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

K zásadnímu pochopení hydrodynamiky v mazání došlo na konci 19. století, kdy si Beauchamp Tower, anglický vynálezce a železniční inženýr, všiml, že olej z kluzného ložiska stále vytékal z díry v oblasti pod zatížením. Výtok oleje byl nežádoucí, tak byla díra zacpána nejdříve korkovou zátkou, což stále oleji umožňovalo vytékat, a posléze tuhou dřevěnou zátkou. Když byla zátku pomalu vytlačována z otvoru, Tower si uvědomil, že došlo k nárůstu tlaku nějakým dosud neznámým mechanismem. Poté Tower začal měřit tlak oleje a zjistil, že by kluzné plochy mohly být odděleny hydraulickou silou.

V době Towerova experimentu pracovali na teorii hydrodynamického mazání i další, a to zejména Osborne Reynolds, anglický fyzik a vynálezce, kterému svá detailní data Tower poskytl. Výsledkem byla teorie hydrodynamického mazání publikovaná v roce 1886. Reynolds poskytl první analytický důkaz, že viskozita kapalin může fyzicky oddělit dva kluzné povrchy hydrodynamickým tlakem, což má za následek nízké tření i opotřebení [1].

### 2.1 Režimy mazání

Nízká viskozita tenké vrstvy plynu, kapaliny nebo pevné látky, která se nachází mezi dvěma povrchy, zlepšuje plynulost pohybu jednoho povrchu po druhém a zabraňuje jejich poškození. Tyto vrstvy materiálu, oddělující povrchy kontaktních těles, jsou obvykle velmi tenké a těžko udržitelné. Běžně platí, že tloušťka těchto filmů je v řádech mikrometrů, ale může být i tenčí či tlustší. Znalosti související se zlepšením nebo s určením efektivnosti těchto filmů za účelem prevence poškození v kontaktu tuhých těles se obecně nazývají jako mazání [1].



Obr. 2-1 Stribeckova křivka [3]

Rozlišují se režimy mazání, při kterých dochází k bezprostřední interakci mezi třecími povrchy (mazání mezní a mazání tuhými mazivy) a režimy, při kterých dochází k oddělení třecích povrchů koherentním mazacím filmem [2].

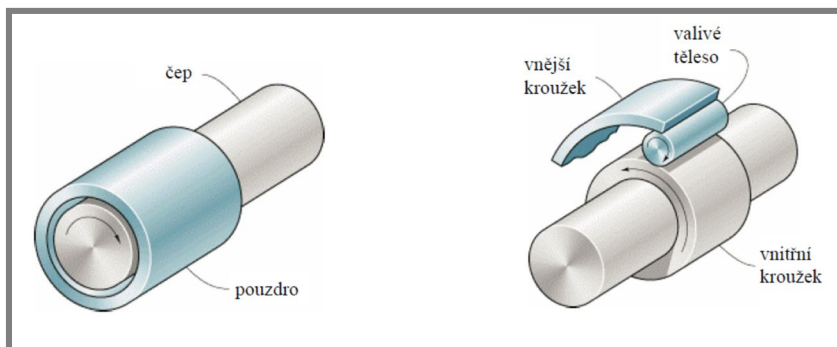
## 2.2 Kapalinové mazání

2.2

---

Se zvyšujícím se Gümbelovým číslem dochází sice k nárůstu součinitele tření, avšak mezi třecími povrchy se vytváří koherentní mazací film, který zabraňuje jejich vzájemné interakci. Nastává kapalinové mazání, při kterém je velikost tření závislá pouze na reologických vlastnostech maziva, zejména na jeho viskozitě. Podle toho, zda třecí povrchy jsou konformně či nekonformně zakřiveny, lze kapalinové mazání dále rozdělit na mazání elastohydrodynamické a hydrodynamické [3].

Nekonformní povrchy se stýkají ve velmi malé ploše, která je až o tři řády menší než v případě konformních povrchů. Přenášená zatížení bývají relativně velká a se zvětšováním zatížení roste i kontaktní plocha. Příkladem jsou valivá ložiska a ozubené převody.



Obr. 2-2 Konformní (vlevo) a nekonformní (vpravo) povrchy [4]

Konformní povrchy do sebe zapadají s velkou geometrickou přesností, takže jejich zatížení je přenášeno po relativně velké ploše. Zatížení bývají poměrně malá a nezpůsobují podstatné zvětšování kontaktní plochy. Typickým příkladem jsou kluzná ložiska [4].

### 2.2.1 Režimy kapalinového mazání

2.2.1

---

V kontaktu plně zaplaveném mazacím filmem existují čtyři různé hydrodynamické režimy. V mazaných kontaktech, kde mají dva povrchy odpovídající si tvary, je dosaženo vysokého stupně lokální konformity, což vede k relativně malým kontaktním tlakům (1 až 50 MPa). Tyto tlaky jsou moc malé na to, aby zvýšily viskozitu maziva v kontaktu nebo výrazně změnily jeho geometrii. To odpovídá režimu známému jako izoviskozně-tuhý režim mazání neboli hydrodynamické mazání, kde jsou elastické deformace nevýznamné vzhledem k tloušťce mazacího filmu. Dalším režimem je elasto-hydrodynamické mazání poddajných povrchů, jinými slovy izoviskozně-elastický režim, kde jsou elastické deformace již významné, ale je zde malý kontaktní tlak, aby způsobil změnu viskozity. Další režimy se nazývají piezoviskozně-tuhý, kde jsou malé deformace, ale již dochází ke změně viskozity, a piezoviskozně-elastický, což je již plně vyvinuté elasto-hydrodynamické mazání [4, 5, 6].

### 2.2.2 Bezrozměrné parametry a mapa režimů

Bezrozměrná tloušťka mazacího filmu  $H$  dle Downsona a Higginsona [7] může být vyjádřena vztahem s bezrozměrnými parametry rychlosti  $U$ , zatížení  $W$ , materiálu  $G$  a parametrem elipticity  $k$ :

$$H = f(U, W, G, k)$$

po dosazení:

$$\frac{h}{R_x} = f\left(\frac{u\eta_0}{E'R_x}, \frac{F}{E'R_x^2}, \alpha E', \frac{a}{b}\right) \quad (1)$$

Někteří autoři, jako například Moes [8], dokázali počet těchto bezrozměrných parametrů o jeden snížit. Tloušťka mazacího filmu může být vyjádřena pomocí bezrozměrných parametrů tloušťky mazacího filmu  $\hat{H}$ , viskozity  $g_V$  a elasticity  $g_E$ :

$$\hat{H} = f(g_V, g_E, k)$$

kde:

$$g_V = \frac{GW^3}{U^2} \quad (2)$$

$$g_E = \frac{W^{8/3}}{U^2} \quad (3)$$

Pro minimální tloušťku mazacího filmu v izoviskozním hydrodynamickém mazání byl odvozen vztah [7]:

$$\hat{H}_{IRmin} = 128\alpha_r \left[ 0,131 \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_r}{2}\right) + 1,683 \right]^2 \left( 1 + \frac{2}{3\alpha_r} \right)^{-2} \quad (4)$$

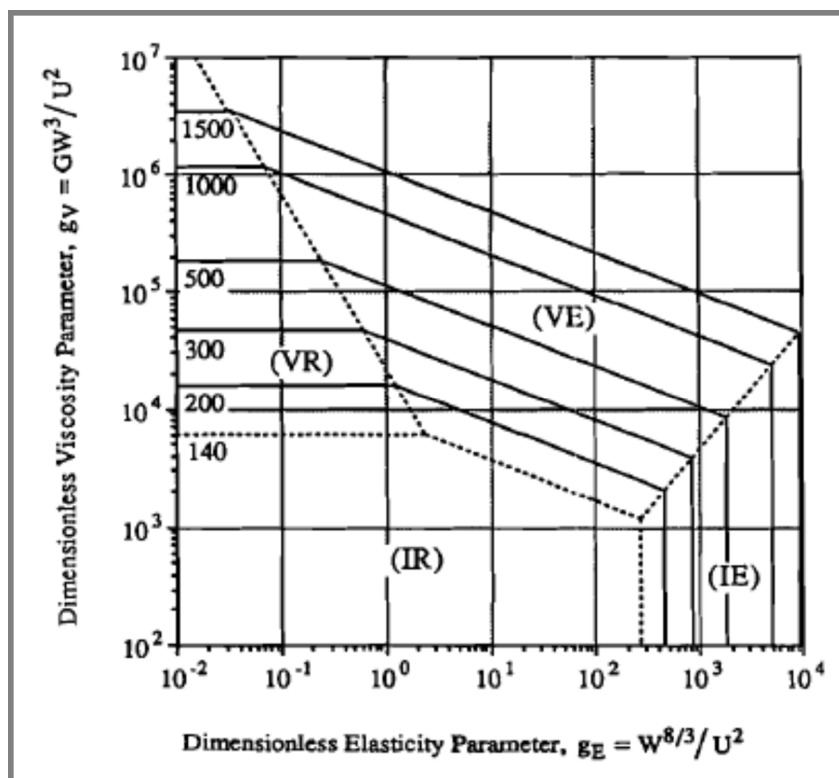
kde:

$$\alpha_r = \frac{R_y}{R_x} \quad (5)$$

Pro predikci tloušťky mazacího filmu se využívají numerické modely řešící kombinace Reynoldsovy rovnice. K posouzení, ke kterému režimu kapalinového mazání pro dané provozní podmínky dochází, se používají mapy režimů mazání. Jejich uspořádání je určeno použitým souborem bezrozměrných parametrů.

Dowsonovy a Higginsonovy bezrozměrné parametry podávají názornou představu o vlivu provozních parametrů jako jsou zatížení, rychlosti třecích povrchů a vlastnosti materiálu na tloušťku mazacího filmu. Moesovy bezrozměrné parametry jsou vhodné pro grafické rozlišení jednotlivých režimů kapalinového mazání [9].



Obr. 2-3 Mapa režimu mazání pro parametr elipticity  $k = 1$  [8]

Po výpočtu bezrozměrné tloušťky mazacího filmu pro jednotlivé čtyři mazací režimy je možné sestavit mapu režimů kapalinového mazání. Mapa režimů pro parametr elipticity  $k = 1$  je na Obr. 2-3.

## 2.3 Mazání texturovaných ploch

2.3

Mechanismy mazání v konformních kontaktech, jako jsou především ty v hydrodynamickém režimu mazání, byly důkladně popsány a formulovány. Avšak mechanismy utváření mazacího filmu v texturovaných konformních kontaktech byly prozatím popsány spíše okrajově. Velké množství badatelů přispělo k dnešním znalostem texturování povrchu v konformním kontaktu, avšak stále je velmi malé množství jejich úspěšných aplikací, což ukazuje komplikovanost této vědní oblasti.

### 2.3.1 Texturování

2.3.1

Texturování povrchu je přístup úpravy povrchu, který vede ke zlepšení tribologických vlastností součásti jako je tření a odolnost vůči opotřebení. Výsledkem těchto úprav mohou být jak výstupky, tak důlky, které jsou více časté, a to zejména z důvodů výhod mikro-lubrikace a snadnější výroby [10].

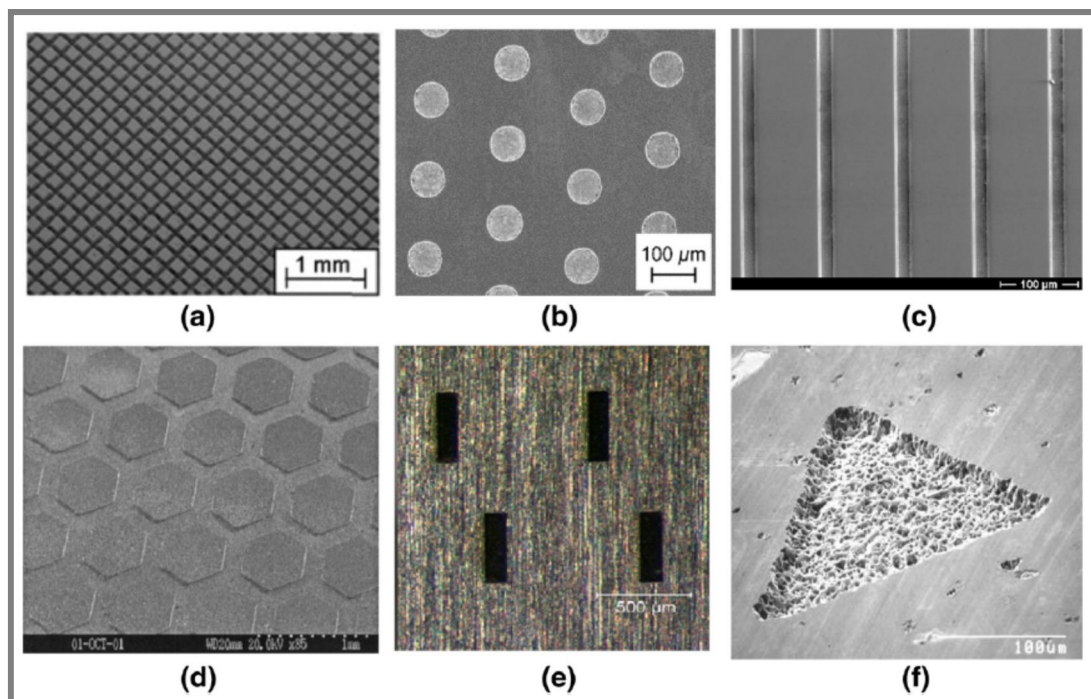
### 2.3.2 Vlastnosti textur

2.3.2

Výkonnost modifikovaných povrchů závisí na geometrických charakteristikách povrchové textury a provozních podmínkách komponent. V hydrodynamickém a smíšeném mazání působí negativní mikro-kavity jako zásobárna maziva, zatímco v mezním režimu mazání jako zachycovače částic opotřebení pro snížení dalšího odírání (abraze). U výstupků je kontaktní oblast mezi povrchem a vyčnívající

geometrií mnohem větší v porovnání s důlkovým povrchem, což vede k vyššímu průměrnému kontaktnímu tlaku a vyššímu opotřebení.

Typické tvary používaných textur (vystoupělých i zapuštěných) jsou čtverce (a), kruhy (b), rýhy (c), šestiúhelníky (d), obdélníky (e) a trojúhelníky (f) (viz Obr. 2-4). Kruhové důlky jsou nejčastěji používaným geometrickým vzorem kvůli jejich jednoduché výrobě a nízké ceně.



Obr. 2-4 Příklady tvarů textur [11]

Klíčovou geometrií jsou hloubka, profil tvaru dna, hustota textury, orientace povrchové textury ke směru kluzu a buněčné uspořádání textury. Pokud povrchové úpravy nejsou optimalizovány, může mít struktura negativní účinek na tribologickou výkonnost kontaktního páru, např. redukce tloušťky mazacího filmu kvůli velmi hluboké textuře [11, 12].

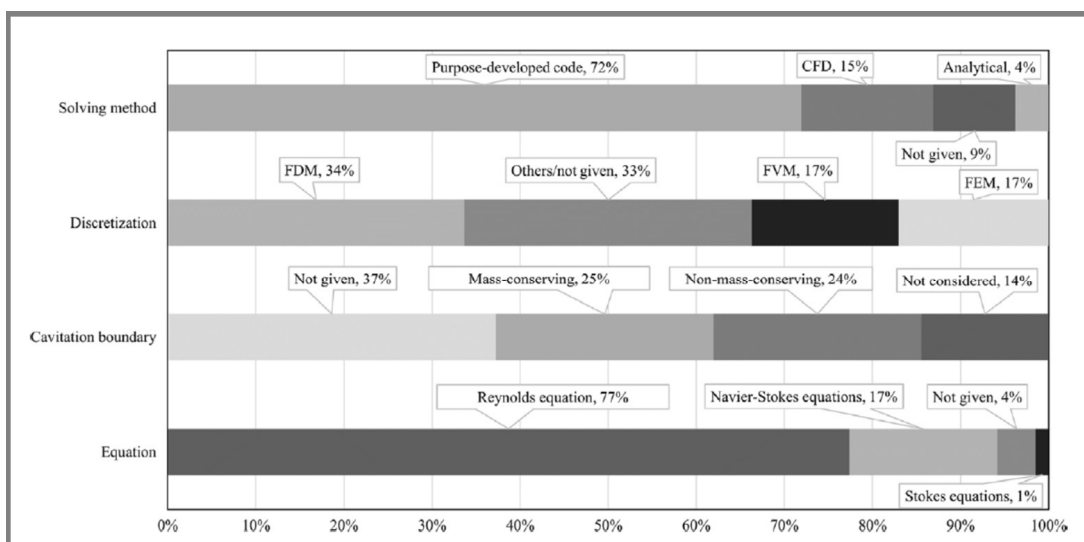
### 2.3.3 Výroba textur

Pro výrobu textur bylo se zvyšujícím se zájmem o zlepšení tribologických vlastností vyvinuto mnoho technik. Ze začátku se k texturování používalo leptání. Později pak vibro-válcování, kdy tvrdý indentor tvořil mělké drážky na povrchu kovových součástí. Další texturovací techniky jsou například „Laser Surface Texturing“ (LST), reaktivní iontové leptání, litografie a anizotropní leptání nebo mikro-odlévání. Tyto pokročilé techniky výroby textur začínají být čím dál více využívány jako inženýrský nástroj ke zlepšení výkonnosti součástí ve specifických aplikacích. Nabízí vyšší přesnost, snadnost výroby a nižší procesní náklady [11, 13].

## 2.4 Teoretické výpočtové modely

Vlivem textur a drsnosti na tribologické vlastnosti kontaktní dvojice se zabývaly stovky studií již od roku 1966 z nichž je více než 50 % teoretických. Byla zkoumána aplikace textur na kluzná ložiska, pístní kroužky, mechanická těsnění atd. Většina těchto výzkumů byla založena na vytvořeném teoretickém modelu, využívajícím převážně Reynoldsovu rovnici, nicméně až v posledních letech jsou tyto teoretické modely na takové úrovni, že je možné relativně přesně předpovědět vzniklé přechodné jevy, kavitaci v textuře, teplotní jevy, deformaci aj. [10]

Pro výpočty povrchových textur se ve studii Ma a Zhu [14] používají výpočtové modely založené na Reynoldsově a Navier-Stokesově rovnici. Navier-Stokesova rovnice slouží k výpočtu toku maziva většinou přes jednu buňku textury. Výsledek je pak zprůměrován dle faktorů průtoku a dále použit v Reynoldsově rovnici pro větší texturovanou oblast.



Obr. 2-5 Průzkum teoretických studií [10]

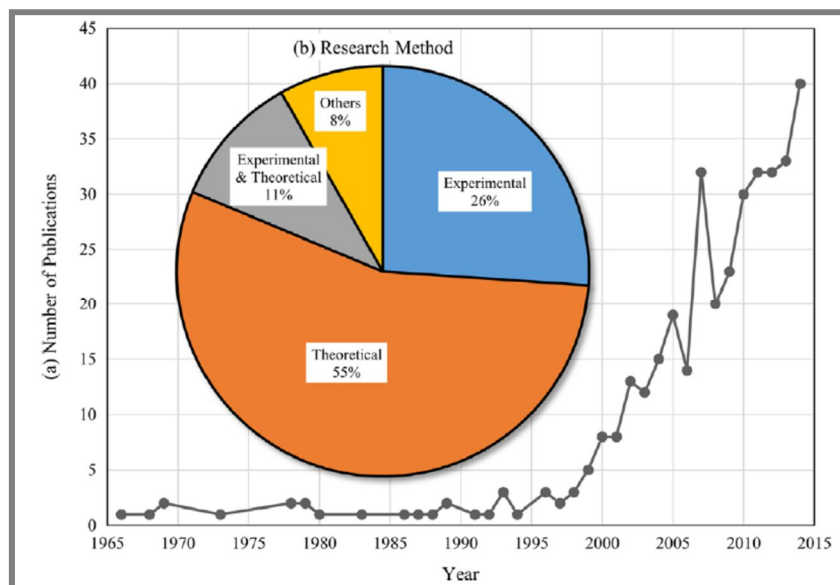
Z výsledků výpočtového modelu bylo zjištěno, že poměr hloubky k průměru důlku je jedním z nejdůležitějších parametrů textury. Pokud je tento poměr vhodně zvolený, je možné zvýšit tloušťku mazacího filmu a snížit tření v kontaktu. Hlavními výsledky této studie jsou zjištění, že čím vyšší je optimální průměr důlku, tím vyšší je jeho odpovídající hloubka a že se při zvyšování rychlosti, popř. snižování zatížení, optimální hloubka zvyšuje, zatímco se optimální průměr důlku snižuje.

Reynoldsovy a Navier-Stokesovy rovnice využili ve svých modelech i další autoři [15, 16], kteří tyto rovnice doplnili o Swift-Steiberovu kavitační okrajovou podmínku, popř. o poloviční Sommerfeldovu kavitační okrajovou podmínku.

Teoretické modely však mohou mít vzájemně si odporující výsledky, tudíž většinou vyžadují experimentální ověření.

## 2.5 Experimentální studie konformních texturovaných kontaktů

V roce 1966 Hamilton a kol. [17] zjistili, že mikro-nepravidlosti na povrchu rotačních těsnění hřídelí jsou schopny vytvářet hydrodynamický tlak a tím zvýšit únosnost součástí. Zvýšení tlaku bylo způsobeno lokální kavitací vzniklou v místech těchto nepravidlostí. Tyto práce byly inspirací k využití texturování povrchu za účelem snížení tření v hydrodynamických kontaktech.

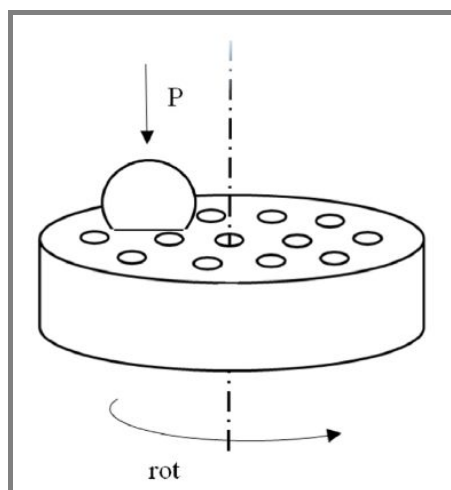


Obr. 2-6 Počet publikací na povrchové textury v minulých 50 letech

Jedna z prvních úspěšných aplikací texturování povrchu byla na povrchu vložky válce ve spalovacím motoru v roce 1986 [18]. Mikro rýhy vytvořené honováním byly schopny udržet dostatečné množství maziva potřebné pro vytvoření mazacího filmu mezi povrchem pístu a vložky válce. Zároveň tyto rýhy zadržovaly částice z opotřebení materiálu a zvyšovaly tak životnost součástí.

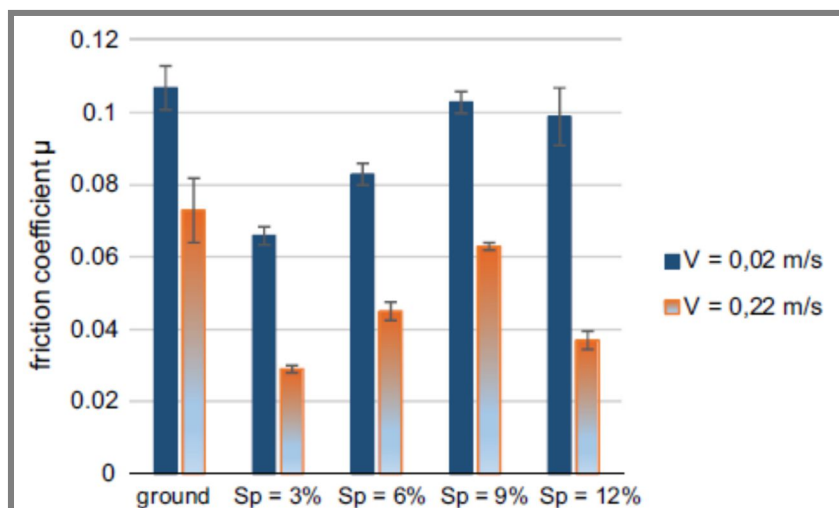
Galda a kol. [12] prezentovali výsledky výzkumu kluzných dvojic ocel-ocel. Povrch koule byl broušen pro získání jednotného kontaktu zhruba  $10 \text{ mm}^2$  se spolupůsobícím diskem a povrch disku byl válečkován pro získání plochy s a bez důlků. Cílem práce je zhodnocení možnosti zlepšení tribologických charakteristik při hladovějícím mazání pomocí vytvoření textury na kluzném povrchu.

Pomocí texturování povrchu je možné zlepšit tribologické charakteristiky, avšak pro provozní podmínky musí být adekvátně zvoleny rozměry textur. Uspořádání důlků bylo totožné pro všechny zkoumané série testů, přičemž jediným rozdílem byla plošná hustota  $S_p$  a objem jednotlivých důlků.



Obr. 2-7 Schéma konfigurace kontaktu [12]

Topografie povrchu je důležitým faktorem, který zásadně ovlivňuje tribologické vlastnosti. Aplikace důlků pomocí leštění vede ke snížení tření při hladovějícím mazání. Největší snížení tření oproti netexturovaným vzorkům, a to o 60 %, bylo dosaženo při kluzné rychlosti  $(0,02 \text{ až } 0,22) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  u důlků s hloubkou  $17 \text{ } \mu\text{m}$ , poměrem  $h/d = 0,11$  a plošnou hustotou důlků  $S_p = 3 \text{ } \%$ . Během testů důlky plnily roli mikro-olejových rezervoárů a dodávaly tak mazivo mezi spolupůsobící povrchy. Mazání pomohlo k zabránění kontaktu ocel-ocel (hraničního tření), což by bylo kritické zvláště z důvodů způsobení zadření spolupůsobících součástí, poškození jejich povrchu a opotřebení.

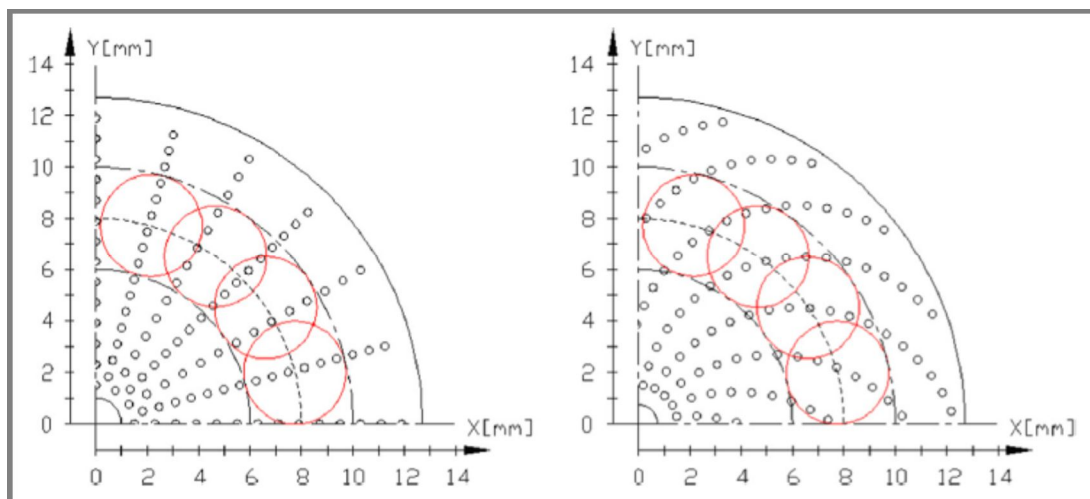
Obr. 2-8 Průměrné hodnoty koeficientu tření při zatížení  $31 \text{ N}$  ( $\approx 1 \text{ MPa}$ ) [12]

Zjištěním účinku důlkové geometrie na snížení tření v konformním kontaktu se zabývali také Liew a kol. [19]. Důlky však byly vytvořeny technologií elektrojiskrového obrábění (EDM) a byly testovány za mezního a smíšeného mazacího režimu. Byly připraveny čtyři typy vzorků, jeden bez textur a tři s rozdílnými tvary textur, ale s jejich stejnou hustotou  $10,4 \text{ } \%$ , na povrchu hliníkové slitiny (EN AW 7075 – „letecký dural“). Kontakt byl realizován mezi hliníkovým vzorkem a diskem z rychlořezné oceli na tribometru *pin-on-disc*. Tribologické testy

byly prováděny za zvyšující se kluzné rychlosti a se stálým nominálním kontaktním tlakem pro jednotlivé série experimentů. Koeficient tření u vzorků s důlkovou geometrií vytvořenou pomocí EDM byl o (11 až 24) % nižší než u netexturovaných.

U ploch texturovaných pomocí technologie EDM bylo viditelné snížení tření v závislosti na tvaru geometrie textury. U vzorků s kruhovými důlky bylo dosaženo největšího snížení tření oproti hladkému vzorku. Geometrie důlků má značný vliv na snížení třecí výkonosti součástí, přičemž kruhové důlky vykazovaly největší snížení tření a opotřebení v porovnání s ostatními testovanými tvary a hladkým povrchem.

Vlivem texturování konformních kontaktů se zabývali také Vos a kol. [20]. V jeho experimentech byly texturovány dokonce oba kluzné povrchy. Byly provedeny testy pro zjištění efektu texturování povrchu a hustoty sítě dentů na minimální požadované množství maziva zajišťujícího malé třecí síly v konformním kontaktu za hladovějících podmínek. Na tribometru *pin-on-disc* byly testovány vzorky s oběma texturovanými kontaktními plochami, jednou texturovanou plochou a oběma netexturovanými plochami.

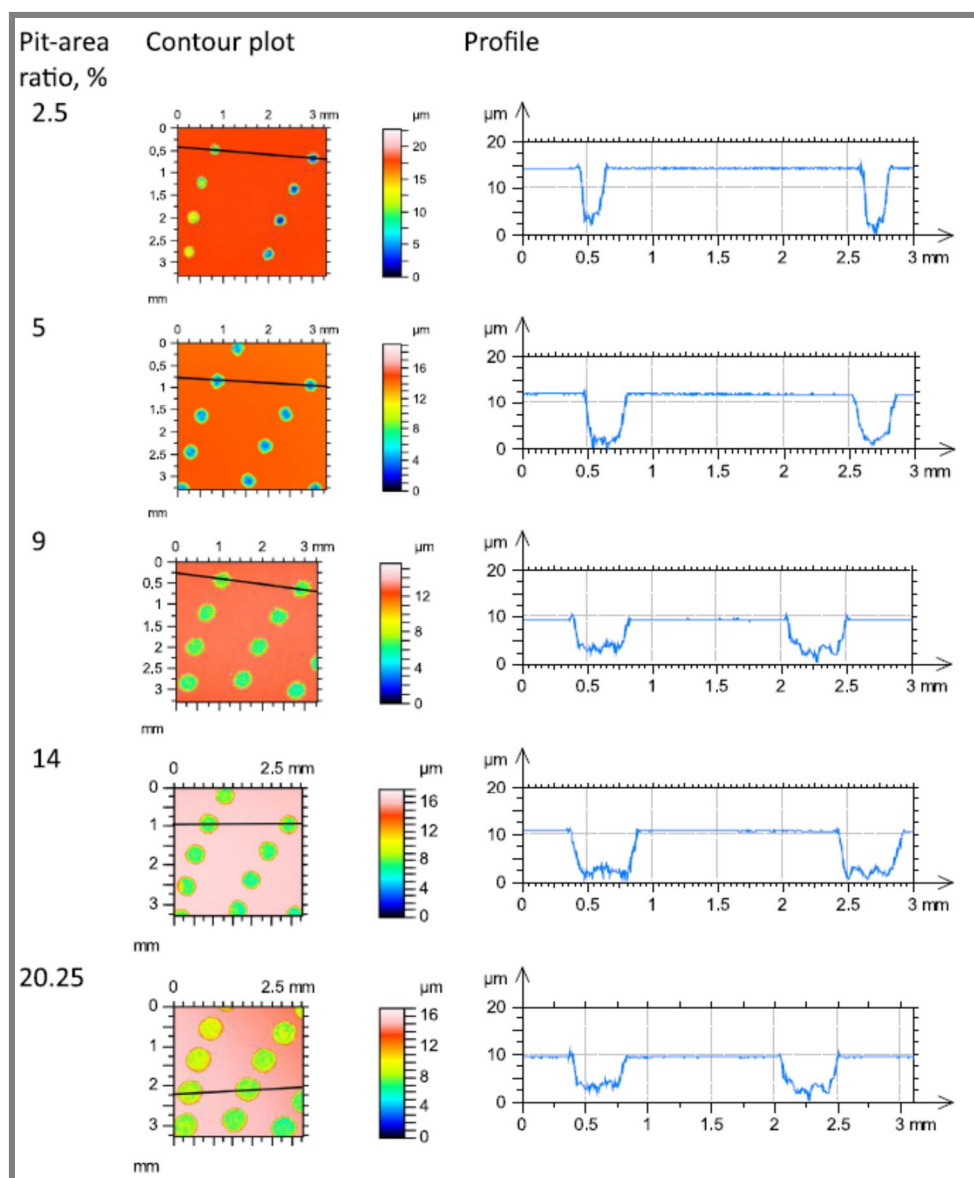


Obr. 2-9 Důlky v kontaktu při rotaci disku s hustotou textury 17 % [20]

Důlky se v kontaktu chovají jako dodatečné zdroje maziva a zachycují nečistoty a pozůstatky z opotřebení, čímž mohou zlepšit tribologické vlastnosti kluzných ploch, bránit abrazivnímu opotřebení a také zadření při hladovění.

Před každým testem byla dodána kapka maziva do centrální oblasti disku bez dalšího doplňování během testu. Ocelové vzorky s tvrdostí 50, resp. 35 HRC byly zatěžovány konstantní silou 20 N, při kluzné rychlosti  $0,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , s počtem otáček  $10\,000 \text{ rpm}$  a při teplotě  $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .





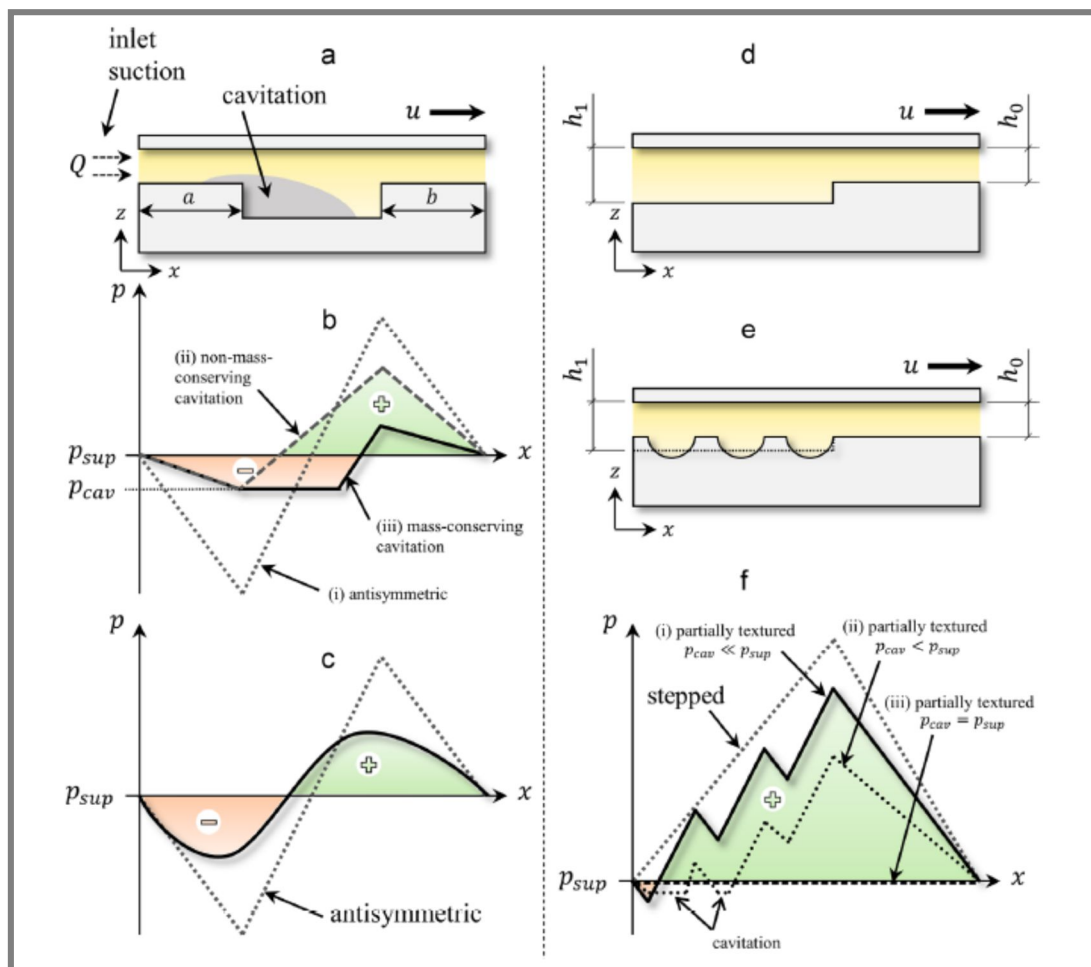
Obr. 2-10 Profily texturovaných ploch [20]

Netexturované povrchy v kontaktu vykazovaly třecí sílu 1 N. Pro vzorky s hustotou dentů 5 % byly hodnoty třecí síly téměř totožné jak pro obě plochy texturované, tak pro pouze jednu plochu s denty. Zároveň u těchto vzorků došlo k největšímu poklesu třecí síly oproti netexturovaným plochám, a to na 0,4 N. U vyšších hustot (14 % a 20,25 %) byly lepší výsledky pouze u jedné plochy texturované – 0,55 N, resp. 0,58 N. Zvýšení hustoty dentů vede k lepší stabilizaci třecí síly. Výsledky rovněž potvrdily, že spirálovité uspořádání textury vede k většímu zlepšení tribologických vlastností než uspořádání v radiálních řadách.

Z výsledků rovněž vyplývá, že zvýšení kluzné rychlosti má za následek snadnější generování hydrodynamického zdvihu u mělkých dentů. Uspořádání důlků je také velmi důležité pro dosažení lepších tribologických výsledků.

Ze studie Menga a kol. [21] vyplývá, že důlky způsobují výskyt lokální kavitace, což může vést k asymetrickému rozložení tlaku v textuře v okamžiku, když mazivo

prochází rozbíhavou kontaktní oblastí. Pokud se vstupní a kavitační tlaky rovnají, tlakový gradient se neobjeví, a to vede k hladovění uvnitř důlku, tudíž nedojde k nárůstu tlaku.



Obr. 2-11 a – buňka texture, b – rozložení tlaku v buňce texture s kavitací, c – rozložení tlaku v buňce texture s vlivem setrvačných sil, d – „stepped“ profil, e – texturovaný profil, f – rozložení tlaků [10]

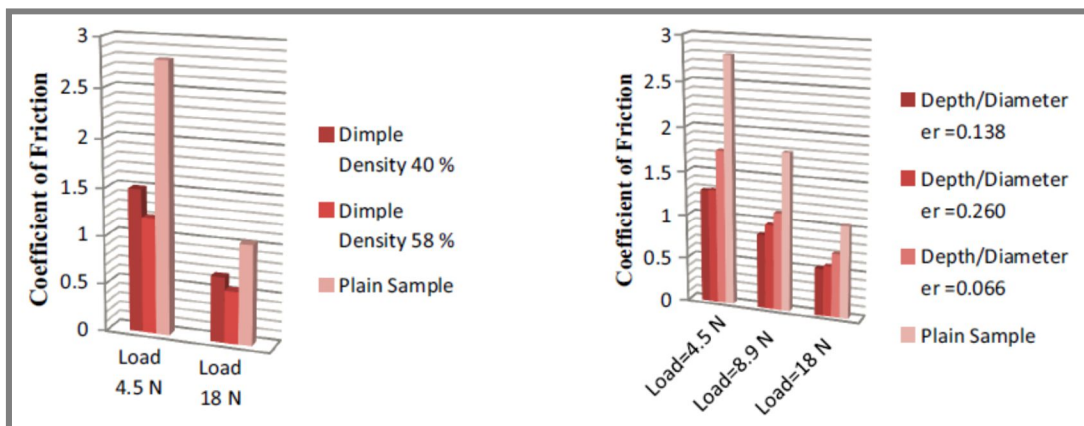
Dalším způsobem k navýšení únosnosti je posunutí texture vůči vstupní oblasti kontaktu. To povede, i v případě, že nedojde ke kavitaci, k navýšení tlaku. Kavitace proto nemůže být nazývána mechanismem způsobujícím nárůst únosnosti.

Optimální parametry texture nejsou závislé na rychlosti a viskozitě maziva. Nicméně výsledkem změny těchto hodnot může být výskyt kavitace, což může změnit optimální parametry texture. Obecně je kavitační efekt důležitý, protože způsobuje náhlé změny ve výkonnosti a parametrech texture. V závislosti na specifické aplikaci textur může jejich použití zlepšit, ale také zhoršit vlastnosti kontaktu.



## 2.6 Experimentální studie zabývající se vlastnostmi textur

Qiu a kol. [22] zkoumali šest různých tvarů textur v plynném mazaném ložisku a optimalizovali každou texturu změnou její geometrie a hustoty. Zjistili, že tření a únosnost ložiska ovlivňuje hustota textury více než poměr hloubky k průměru důlku (aspect ratio).



Obr. 2-12 Vliv hustoty struktury na koeficient tření s poměrem hloubky/průměru 0,1 a vliv h/d poměru při hustotě textury 25 % [22]

Bylo zjištěno, že optimální geometrie pro každý tvar není vždy stejná, ale podobná, a že pravidelný tvar s oblými nebo zakřivenými okraji (např. elipsa) snižuje tření a zvyšuje únosnost součástí v kontaktu nejvíce v porovnání s ostatními tvary, přičemž optimální geometrie je téměř nezávislá na provozních podmínkách. Lichoběžníkový tvar během obousměrného hydrodynamického kluzu předčil pravidelné tvary jako kruh a elipsu. Pro nejlepší zlepšení výkonnosti je třeba zvolit co nejvyšší možnou hustotu dentů na dané ploše. Optimální hloubku dentů je třeba volit v závislosti na provozních podmínkách. Například v případě sestavy píst/válec bylo dosaženo vyššího snížení tření s použitím částečně texturovaného pístního kroužku než s plně texturovaným kroužkem [11, 22, 23].

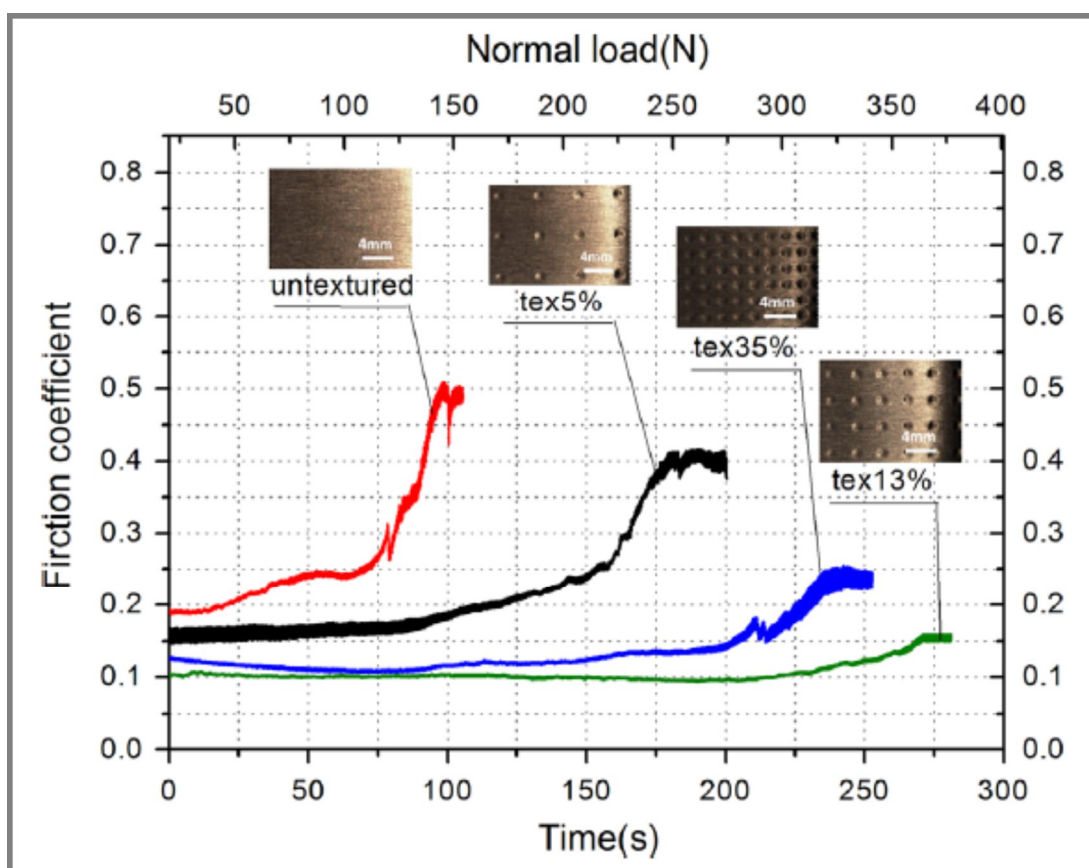
Geometrie povrchu kluzných elementů hraje významnou roli při zajištění dobré provozní výkonnosti. Povrch by měl být dostatečně hladký, aby nedošlo k přerušení hydrodynamického mazacího filmu. Nicméně nerovnosti dokáží udržet mazivo v případě hladovění, kdy mazací látka neoddelí spolupracující plochy a část zatížení je proto přenášena kontaktní oblastí. V tomto případě mohou povrchové důlky zlepšit mazací vlastnosti pomocí navýšení kapacity udržení maziva [24].

Dodávání maziva má rovněž vliv na snižování tření. Brito a kol. [25] zjistili, že výkonnostní parametry ložisek jsou ovlivněny mimo jiné počtem drážek na jejich povrchu. Během rozběhu byla ložiska extrémně náchylná k zadření. K zajištění bezpečného provozu není třeba pouze stanovení provozních podmínek, ale také stanovení geometrických parametrů ložisek. Bouyer a Fillon [26] zkoumali kluzná ložiska při změně jeho parametrů, například změny dodávání maziva, radiální vůle, délky ložiska, materiálu ložiska a drsnosti jeho povrchu. Součinitel tření se zvyšoval s rostoucí drsností povrchu, nicméně když byla topografie povrchu izotropní, a když důlky mohly zadržet dostatečné množství maziva, koeficient tření mezi kluznou dvojicí byl s vyšší drsností povrchu nižší. Chování ložiska silně závisí na parametrech

materiálu použitého pro kluznou dvojici. Snížení tření v porovnání texturovaných a vzorků bez textury je v řádech desítek procent (20 až 50) %.

Studie Li a kol. [27] pojednává o testování texturovaných měděných povrchů, na kterých byl vytvořen soubor mikro-důlků pomocí technologie „Laser Peen Texturing“ (LPT), což je nová technologie pro texturování povrchu. Tyto vzorky byly zkoumány za podmínek hladovění. Výsledky ukázaly, že třecí výkonnost povrchu po LPT byla podstatně vyšší než u vzorků hladkých. Rovněž došlo ke snížení abrazivního a adhezivního opotřebení u těchto dvou skupin vzorků a také vyšlo najevo, jaká hustota textury má nejprospěšnější vliv na tření a opotřebení.

S lineárním nárůstem normálové síly došlo u vzorků bez textury k selhání dříve než u texturovaných. Výsledek vypovídá o tom, že povrchové texturování zlepšuje třecí výkonnost u mezního režimu mazání. To je zřejmě důsledkem tzv. sekundárního mazání, což znamená, že mazivo zachycené v důlcích se chová jako sekundární zdroj maziva a může být vtaženo do kontaktu během relativního kluzného pohybu.



Obr. 2-13 Účinek normálové síly na koeficient tření při rychlosti zatěžování 1,27 N/s [27]

Nejpříznivěji ovlivňovaly tribologické vlastnosti vzorky s 13 % hustotou textury v porovnání s ostatními vzorky v tomto experimentu (5 % a 35 %). Výsledkem je, že několik mělkých důlků dokáže dodat do kontaktu dostatečné množství maziva pro snížení tření, popř. pro zachycení pozůstatků opotřebení. U textury s 35 % hustotou dochází k zadržení většího množství maziva, což vede k lepšímu chlazení povrchů a snížení tepla generovaného třením, což koliduje s výsledky dosaženými v člancích [19, 28]. To je zřejmě důvodem, proč tyto vzorky v porovnání se vzorky

o hustotě textury 5 %, vykazovaly snížení adhezivního opotřebení. Nicméně se zvýšením hustoty textury dochází k zmenšení dosedacích ploch a tím pádem ke zvýšení kontaktního tlaku, což způsobuje větší abrazivní a adhezivní opotřebení.

Za vysokých normálových zatížení může být účinek orientace textury zásadní. Když obdélníkové důlky jsou paralelně se směrem kluzu, dojde k tvorbě kanálového mechanismu. Pokud jsou naopak kolmo na směr kluzu, dochází k bočním výtokům maziva a k jeho nedostatku v kontaktní oblasti. Za vysokých rychlostí a nízkých zatížení je zatížení podporováno hydrodynamickým tlakem. Povrchové textury v tomto režimu mají za následek zvýšení hydrodynamického mechanismu mazání a snížení tření. Za nízkých rychlostí a vysokých zatížení je značná část zatížení přenášena kontakty v ložisku. Textury v tomto případě zachycují trosky opotřebení způsobené kontaktem, což snižuje další rýhování, abrazi [28].

Wang a kol. [29] ve svých výzkumech zjistili, že hloubka textury má významný vliv na koeficient tření za smíšeného mazání a že koeficient tření je nepřímo úměrný kluzné rychlosti. Hodnoty koeficientů tření byly za stejných provozních podmínek u texturovaných vzorků výrazně nižší, než tomu bylo u vzorků netexturovaných, přičemž největší snížení tření bylo o 48,3 %.

### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

#### 3.1 Zhodnocení poznatků z rešerše

Přehled povrchových úprav na kontakty konformní i nekonformní odhalil, že texturování třecích ploch má obrovský potenciál ve vylepšení tribologických vlastností v různých provozních podmínkách a aplikacích vůbec.

V hydrodynamickém a smíšeném mazání mohou povrchové textury sloužit k udržení většího objemu kapalinového maziva vytvářejícího doplňkový mikrohydrodynamický zdvih, a tím zmenšovat oblast kontaktu především za hladovějících podmínek, tedy během startu nebo zastavování stroje. Tyto textury mohou rovněž sloužit k zachycení částic vzniklých opotřebením součástí v kontaktu, což vede ke snížení další abraze, zvláště v mezním mazání. Za plně zaplavených mazacích podmínek je optimalizace struktury u konformních kontaktů důležitější než u kontaktů nekonformních.

Prospěšné účinky mikro-textur na tribologické parametry jsou ve snížení tření a zvýšení únosnosti kontaktních ploch s ohledem na tvar textury, její geometrii, vzor a typ kontaktu. Orientace struktury ovlivňuje její účinek nejvíce za vysokých zatížení, kdy při orientaci např. obdélníkových tvarů textur delší stranou kolmo na směr kluzu dochází k bočním výtokům maziva a jeho nedostatku v kontaktní oblasti. Je vhodné vyvinout teoretický model pro analýzu, nejčastěji s využitím Reynoldsovy a Navier-Stokesovy rovnice. Pro přesné určení tribologické výkonnosti je třeba v těchto modelech zahrnout jak materiálové, tak mechanické vlastnosti, jako například viskoelastické tečení a deformaci, ale také provozní podmínky.

Z rešeršní části vyplývá, že úprava povrchu třecích ploch výrazně ovlivňuje tribologické vlastnosti v rozdílných aplikacích a za různých provozních podmínek. Důlková geometrie textur ovlivňuje mazací film zvýšením jeho tloušťky tím, že důlky působí jako sekundární zdroje maziva za hladovějících podmínek. Nicméně je třeba vhodně volit geometrii dentů, protože jejich příliš velká hloubka může tloušťku mazacího filmu naopak snižovat. Významný pozitivní efekt těchto struktur je také v tom, že zachycují částice opotřebené kontaktem. Jako zásadní se jeví optimalizace geometrie struktury, a to její tvar a případná orientace buněk, hloubka a hustota textury.

Texturování bylo úspěšně použito v mnoha aplikacích, např. mechanická těsnění s laserem vyrobenými texturami pro zvýšení životnosti součástí a snížení tření mezi kontaktními povrchy, tvářecí procesy s definovanou topografií povrchu pro ovlivnění adheze a difuze. Tyto aplikace ukazují, že ve specifických situacích lze pomocí textur zvýšit výkonnost součástí. I když jsou funkce textur v literatuře často popisovány, neexistují jasné výsledky, a proto je potřeba dalšího výzkumu. Zjištění, že výsledky jednotlivých studií zabývajících se problematikou texturovaných povrchů jsou velmi různorodé, vede k jejich velmi obtížnému porovnání mezi sebou.

Tato práce popisuje utváření mazacího filmu v texturovaných konformních kontaktech pomocí optické interferometrie, což je efektivní metoda pro studium tloušťky mazacího filmu v nekonformních kontaktech. V posledních letech jsou zřejmé snahy o její aplikaci i na kontakty konformní, zejména ve spojení s texturovanými povrchy.

U nich může nová metoda přispět k pochopení mechanismů, které ovlivňují utváření mazacího filmu.

### 3.2 Cíle diplomové práce

3.2

---

Cílem této práce je popsání mechanismů, které ovlivňují utváření mazacího filmu u texturovaných konformních kontaktů. Vyhodnocován je koeficient tření z třecí a normálové síly a tloušťka mazacího filmu. Samotné mechanismy uvnitř buněk textury jsou popsány z vizuálního obrazu kontaktní plochy. Parametry geometrie textury povrchu jsou zvoleny na základě studia odborných článků. Klíčovou geometrií jsou hloubka, profil tvaru dna, hustota textury, orientace povrchové textury ke směru kluzu a buněčné uspořádání textury. Pokud povrchové úpravy nejsou optimalizovány, může mít struktura negativní účinek na tribologickou výkonnost kontaktního páru, např. redukcí tloušťky mazacího filmu kvůli velmi hluboké textuře. Řešení zahrnuje navržení a zhotovení přípravku pro implementaci optické pozorovací metody na tribometr typu *pin-on-disc*, což umožní zkoumání tloušťky mazacího filmu a jeho utváření.

#### Dílčí cíle diplomové práce:

- navrhnout a realizovat implementaci metody optické interferometrie na tribometr typu *pin-on-disc*
- na základě studia vědeckých článků identifikovat výzkumný problém a navrhnout výzkumné hypotézy
- navrhnout a realizovat texturovaný povrch
- realizovat a vyhodnotit sérii experimentů
- připravit publikaci výsledků

## 4 MATERIÁL A METODY

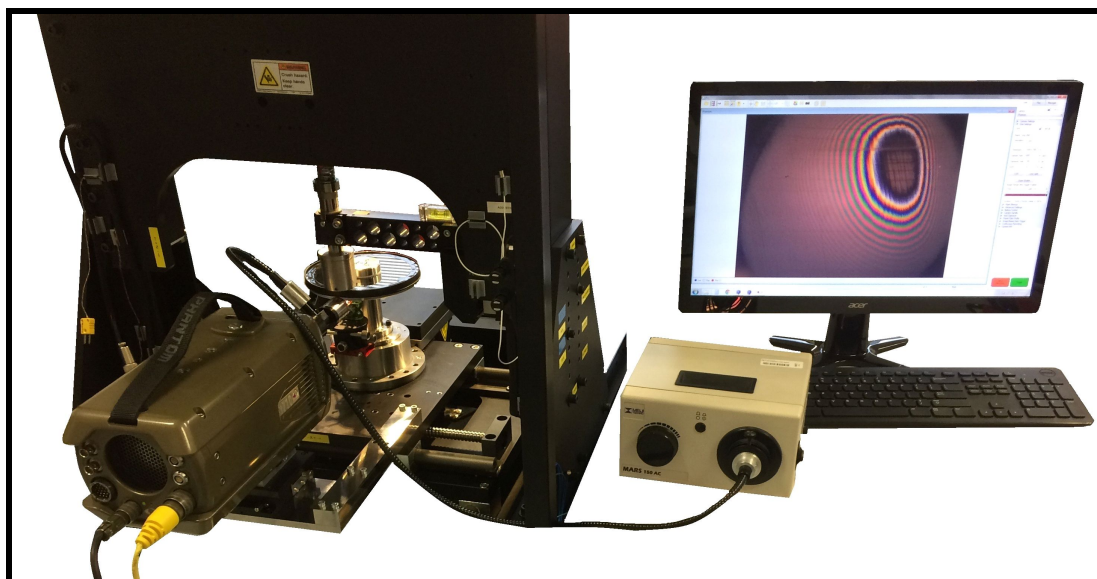
Hlavním cílem této práce je odpovědět na otázku, zda vědomé narušení hladkosti povrchu pomocí textury ovlivňuje jeho tribologické vlastnosti. Tento vliv může být jak kladný, tak záporný, z čehož vyplývá zásadní otázka, čím je účinek povrchových úprav způsoben.

### 4.1 Experimentální zařízení a metodika

Pro získání odpovědí na výše zmíněné vědecké otázky budou provedeny série experimentů, jejichž výsledky budou porovnány s teoretickými výpočty a vyhodnoceny pomocí různých vědeckých přístupů. Popis experimentů a způsob jejich vyhodnocení je popsán v této kapitole.

#### 4.1.1 Popis aparatury

Pro měření bude použit tribometr společnosti *Rtec Instruments*. Univerzální tribometr s označením *MFT* (multifunctional tribometer) má výměnné moduly pro měření tření, opotřebení, scratch testy a další. Rovněž lze měnit parametry měření jako je například rozsah zatěžovací síly od nano-Newtonů po kilo-Newtonty či rychlost pohybu reciproční nebo rotační jednotky [30].

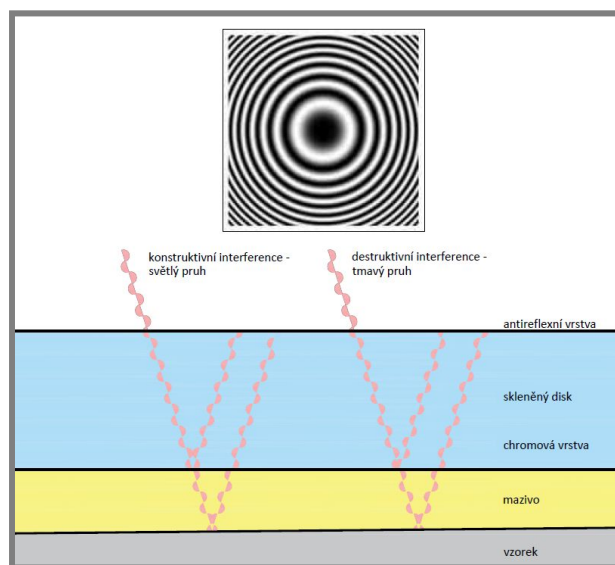


Obr. 4-1 Experimentální zařízení

Pro testování bude využita jednotka umožňující rotační pohyb se změnou rychlosti otáčení. K tomuto modulu bude vyrobena hřídel umožňující upnutí skleněného disku o průměru 150 mm. Strana disku, která bude v kontaktu s povrchem vzorku, je pokryta vrstvou chromu o tloušťce zhruba 20 nm, která slouží jako odrazová vrstva. Z druhé strany disku je vrstva antireflexní, která zabraňuje vzniku světelného svazku na rozhraní vzduch – sklo a zvyšuje celkový kontrast interferenčních proužků. Paprsek světla prochází při pozorování kontaktu diskem, kdy se jeho část odrazí od chromové vrstvy a část prochází dále, až projde vrstvou maziva a odrazí se od povrchu zkoumaného vzorku. Tyto odražené paprsky spolu interferují a tvoří interferogramy,

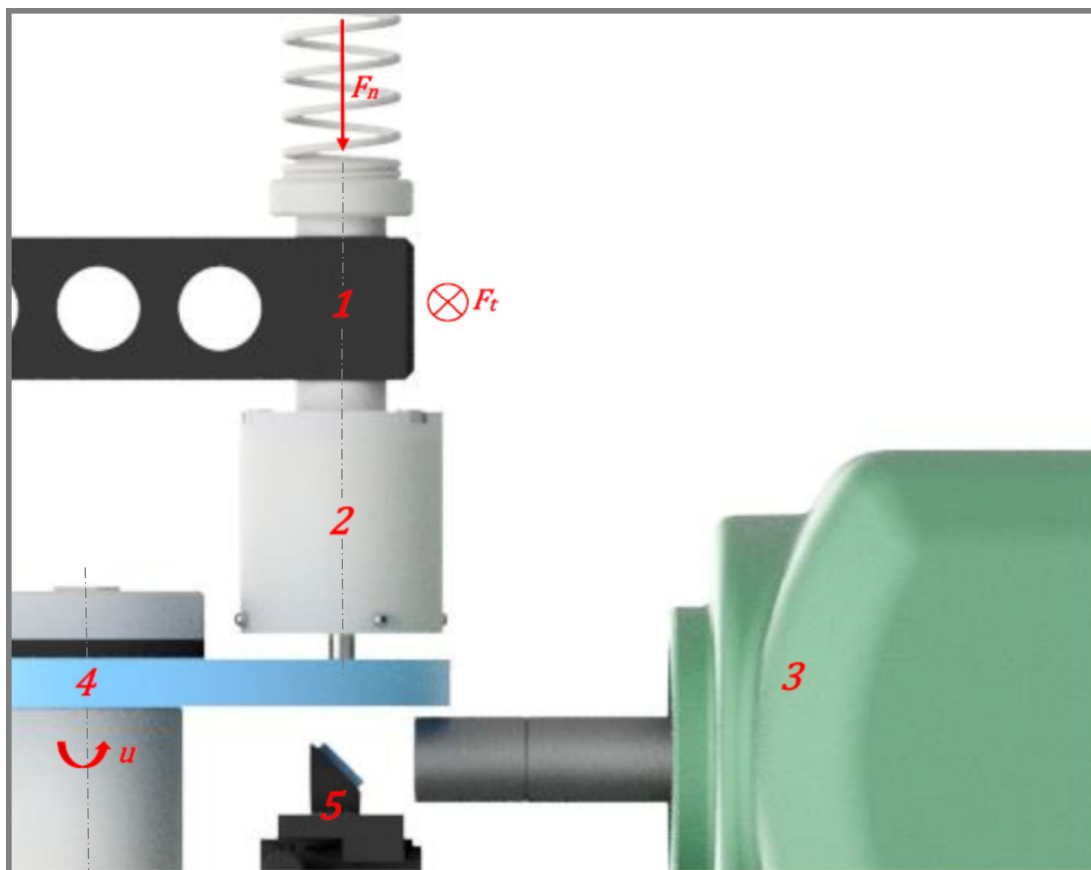


kteře se na základě jejich barevného spektra vyhodnocují. Tímto je určena tloušťka mazacího filmu.



Obr. 4-2 Princip optické interferometrie

Kontakt bude pozorován vysokorychlostní kamerou *Phantom v710*, která je schopna zachytit velmi rychlé tribologické procesy a změny v tloušťce mazacího filmu. Kamera umožňuje snímat rychlostí 7 500 snímků za sekundu při rozlišení 1024x768 pixelů, což je ideální při pozorování tloušťky mazacího filmu za nestacionárních podmínek. Kamera bude osazena mikroskopem *InfiniTube FM-200* s objektivem *Nikon LU Plan Fluor 5x/015* s pětinasobným zvětšením. Do mikroskopu bude napojen světelný kabel z halogenové lampy *Mars 150 AC* s výkonem až 150 W. Sestava kamery bude uložena na posuvném stolku s mikrometrickým šroubem pro zaostření snímaného kontaktu (vzorek – skleněný disk), který bude pozorován přes zrcátko. Vzorek bude uchycen ve vyrobeném přípravku umožňujícím natočení vzorku ve dvou osách. Tento přípravek bude upnut do zatěžujícího ramene tribometru.



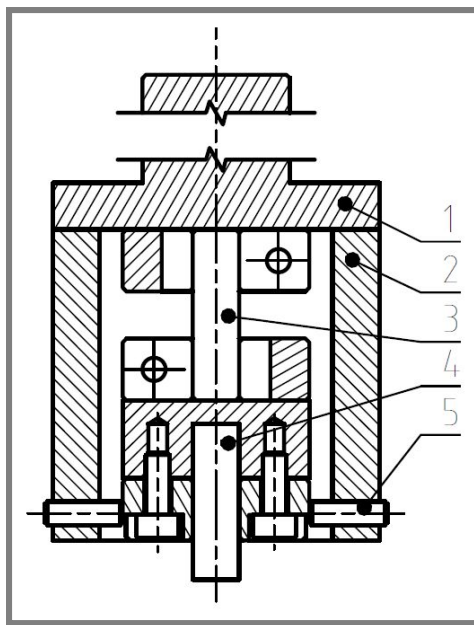
**Obr. 4-3** Schéma experimentálního zařízení: 1 – rameno tribometru, 2 – přípravek se vzorkem, 3 – vysokorychlostní kamera, 4 – skleněný disk, 5 – polohovatelné zrcátko



#### 4.1.2 Přípravek pro upnutí vzorku

4.1.2

Pro přesné ustavení vzorku bude vyroben přípravek s hliníkovým deformačním členem, který umožní natáčení vzorku. Ustavení vzorku pomocí jeho natáčení povede ke snadnému nalezení kontaktní plochy a pozorování kontaktu vůbec. Na Obr. 4-3 je řez přípravkem. 1 – držák přípravku, 2 – trubka, 3 – deformační člen, 4 – vzorek, 5 – stavěcí šroub.



Obr. 4-4 Přípravek

#### 4.1.3 Mazivo

4.1.3

Jako mazivo je zvolen minerální olej FVA3 Tento olej spadá do viskozitní třídy ISO VG 100. Tato norma udává, že kinematická viskozita oleje při 40 °C je v rozmezí (90 až 110) mm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>.

Tab. 1 Parametry oleje FVA3

Typ oleje	Minerální olej
Kinematická viskozita při 40 °C [mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	95,0
Kinematická viskozita při 100 °C [mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	10,7
Hustota při 15 °C [kg·dm <sup>-3</sup> ]	0,885

#### 4.2 Kontaktní tělesa

4.2

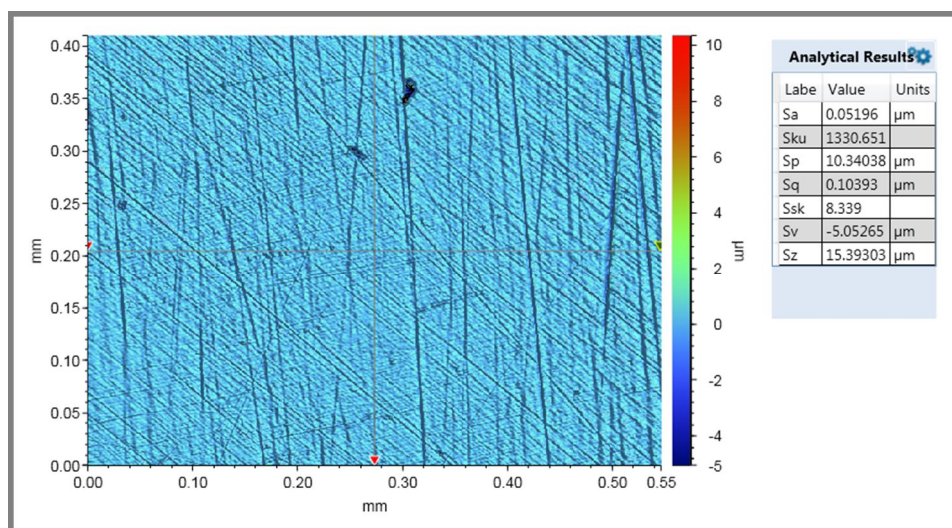
Jako vzorky určené pro experimenty budou použity válečky o průměru 6 mm z ložiskové oceli ČSN EN 14 109 (AISI 52 100) s tvrdostí 66 HRC (dle zkoušky tvrdosti podle Vickerse s testovací silou  $F = 9,8 \text{ N}$ , kdy  $HV1 = 860$ ). Jedná se o obrobitebnou chromovou ocel, která se využívá zejména pro výrobu ložiskových kuliček do průměru 25 mm nebo válečků a kuželíků do průměru 18 mm. Vzorky budou zalaty do methylnmethakrylátové zalévací hmoty *VariDur 200*, což je akrylátová rychle tuhnoucí pryskyřice s vysokou zabíhavostí určená pro tvrdé materiály. Poté bude jejich povrch broušen a leštěn na přístroji *EcoMet 300* s hlavou *AutoMet 250* [31]. Povrch

vzorku bude broušen brusným papírem o zrnitosti (120 až 1200)  $\text{zrn} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Následně budou vzorky leštěny leštící suspenzí se zrnitostí  $6 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$ .

K pozorování a vyhodnocení plochy vzorků bude využit 3D optický profilometr *Bruker ContourGT-X*, což je bezkontaktní profilometr měřící topografii povrchu pomocí interferometrie s řízenou změnou fáze. Zařízení využívá svazek monochromatického světla, který se v děliči rozdělí na dva paprsky, jeden putuje k povrchu referenčního zrcadla a druhý k měřenému povrchu. V děliči interferují oba odražené paprsky a po jejich sečtení je vypočtena výška jednotlivých bodů povrchu, kdy výsledkem celého procesu je interferogram [32].

Pro měření vzorků bude použit objektiv s pětinasobným zvětšením s použitím zdroje zeleného světla. Pro požadované výsledky je třeba adekvátně zvolit metodu měření. Je možno použít metodu *PSI* (Phase Shifting Interferometry), která je pro povrchy leštěné ( $R_a < 10 \text{ nm}$  s vertikálním rozlišením menším než  $0,1 \text{ nm}$ ) s malými výškovými rozdíly. Druhá metoda, *VSI* (Vertical Scanning Interferometry), popř. mód *VXI*, je metoda implementovaná ve vysokém rozlišení, která je vhodná pro povrchy drsnější ( $R_a > 30 \text{ nm}$  s vertikálním rozlišením  $3 \text{ nm}$ , resp.  $(10 - 30) \text{ nm}$  s rozlišením  $0,1 \text{ nm}$  v případě *VXI*) a se strmými plochami, se hodí k pozorování důlkové geometrie. Po získání dat bude plocha v softwaru srovnána pomocí funkce *Terms Removal (F-operator)* s použitím masky na dent, aby rovina nebyla touto geometrií ovlivněna, a nastavením *Tilt only*, jelikož se jedná o plochy rovinné. K dopočítání chybějících dat je vhodné dále využít funkci *Data Restore*, nicméně pro zjištění základní geometrie dentu jako je jeho průměr a hloubka stačí naměřená data. Pro měření drsnosti plochy bude přidán *Gaussian Regression Filter* pro vyhlazení šumu s krátko-vlnovým cut offem  $0,25 \text{ mm}$  dle normy ISO pro aperiodický profil.

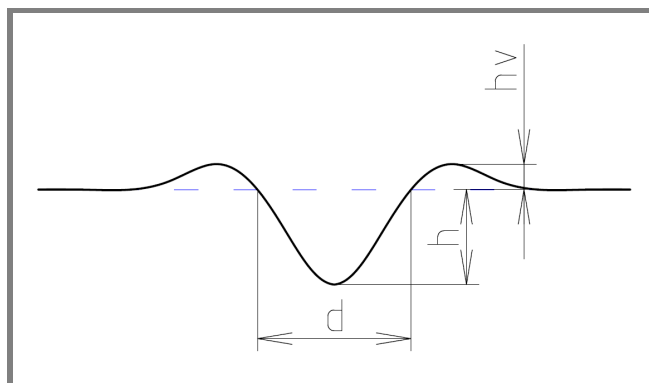
U vzorků bylo dosaženo plošné drsnosti  $S_a = 0,05 \mu\text{m}$  a konformity  $R_x = R_y = 12 \text{ m}$ . Velikost konformity je dostatečná pro dosažení konformního kontaktu, i když se kontakt při nižších kluzných rychlostech může jevit jako bodový.



Obr. 4-5 Drsnost leštěného vzorku měřená na optickém profilometru

### 4.2.1 Texturování vzorků

Pro texturování povrchu vzorků a následně také pro jednotlivé experimenty bude použito zařízení firmy *Rtec Instruments*. Pro tvorbu dentů bude do tribometru upnut Rockwell indentor, jehož hrot je kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a poloměrem kulové části 0,2 mm. Geometrie důlků vzniklá tímto procesem bude měřena na optickém profilometru, kdy způsob jejího vyhodnocování je na Obr. 4-4, kde  $d$  je průměr dentu (průsečík profilu s nulovou čarou),  $h$  výška dentu (vzdálenost dna dentu a nulové čáry) a  $h_v$  je výška vytlačeného materiálu.

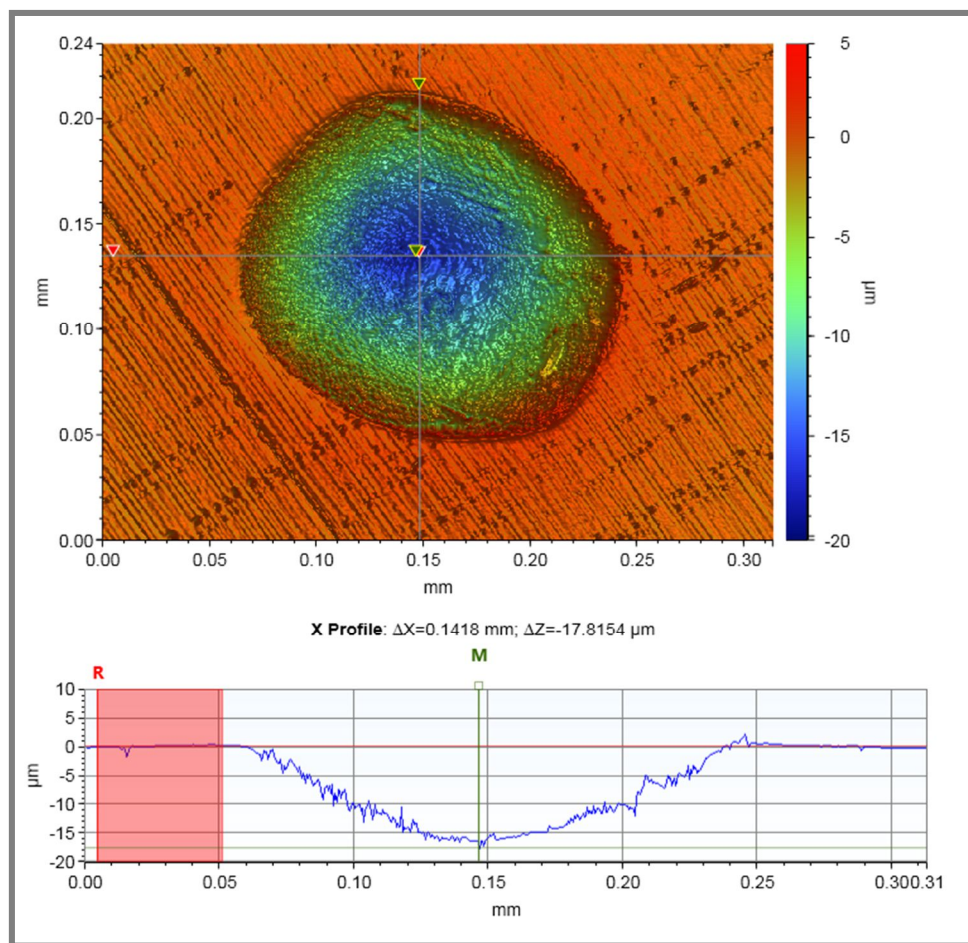


Obr. 4-6 Měřené rozměry důlku

Jednotlivé parametry vtisků při různých zatíženích jsou v Tabulce 2. Při výrobě dentů s větším průměrem, resp. hloubkou, vznikl v okolí vtisku významný val vytlačeného materiálu, což bylo důvodem k opětovnému broušení a leštění povrchu vzorku.

Tab. 2 Parametry důlkové geometrie

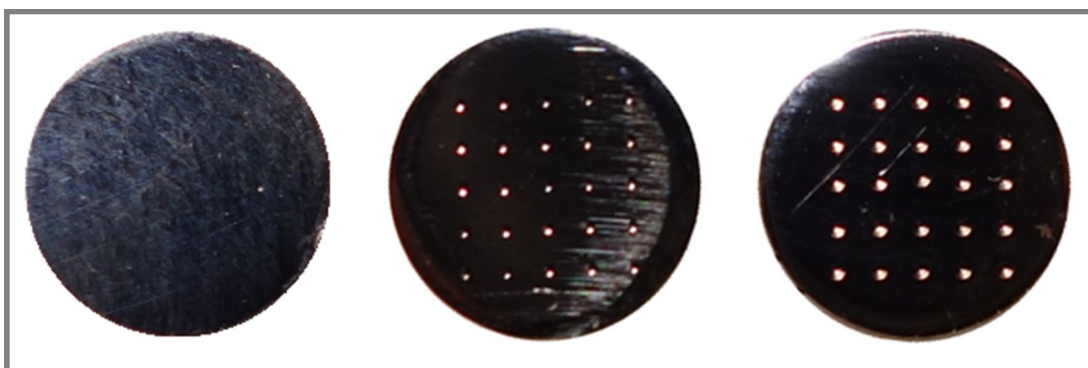
F [N]	h1 [μm]	h2 [μm]	d1 [μm]	d2 [μm]	h <sub>v</sub> 1 [μm]	h <sub>v</sub> 2 [μm]
100	10,6162	10,0173	115,5	129,9	0,6326	0,8943
200	19,8306	20,6724	167,6	173,1	1,2190	1,9895
300	27,8031	27,5715	197,4	209,4	2,2935	3,2091
400	34,2374	33,4882	227,3	237,4	2,3803	2,8306
500	39,5769	41,3312	249,6	263,9	4,1179	4,9905
600	46,6192	46,7604	270,1	282,1	4,8108	4,2924
700	52,5527	53,5988	298,0	315,6	3,6471	3,2242
800	57,4554	61,0090	314,8	332,3	3,4229	3,0022
900	62,8077	63,6516	335,3	350,5	5,9234	6,0186
1000	68,0425	68,9338	352,1	370,0	5,1086	4,6245



Obr. 4-7 Dent vytvořený Rockwell indentorem silou 200 N s odstraněným valem materiálu

#### 4.2.2 Experimentální vzorky

Vzorky, použité v experimentech, byly vytvořeny silou 200 N, resp. 800 N, a následně u nich byl odstraněn vzniklý val vytlačeného materiálu. Výsledné povrchy vzorků po výše zmíněných technologických operacích jsou na obrázku 4-6. Denty jsou rozloženy ve čtvercové síti ve vzdálenosti 0,8 mm od sebe. Vlevo je vzorek s hladkým povrchem, uprostřed s denty o hloubce 17  $\mu\text{m}$ , což odpovídá plošné hustotě textury  $S_P = 3 \%$ , a vpravo s denty o hloubce 50  $\mu\text{m}$ , což odpovídá plošné hustotě textury  $S_P = 9 \%$ .



Obr. 4-8 Vzorky – hladký (vlevo), texturovaný – 17  $\mu\text{m}$  (uprostřed), texturovaný – 50  $\mu\text{m}$  (vpravo)

### 4.3 Typy experimentů

V experimentech budou testovány tři druhy vzorků – hladké, texturované s mělkými denty o hloubce 17  $\mu\text{m}$  a texturované s hlubšími denty o hloubce 50  $\mu\text{m}$ . Jejich parametry jsou voleny na základě výsledků rešeršní části. U vzorků bude vyhodnocován koeficient tření snímáním třecí a normálové síly a tloušťka mazacího filmu získaná metodou optické interferometrie.

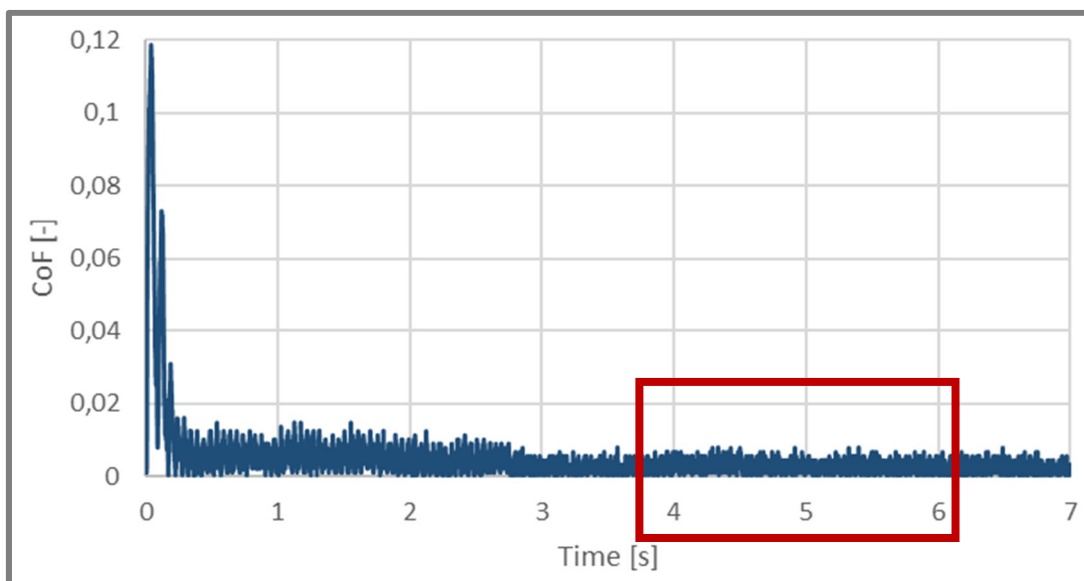
Hladké vzorky slouží k porovnání měřené tloušťky mazacího filmu s predikcí dle vztahů Dowsona a Higginsona, resp. Moese. Vzorky s rozdílnou hloubkou, resp. plošnou hustotou textury, slouží k určení vlivu kruhových důlků na tloušťku mazacího filmu a na koeficient tření při různých kluzných rychlostech, ale při stejném zatížení. Velikost zatížení vychází z experimentů uvedených v rešeršní části práce, kdy kontaktní tlak je v řádu jednotek mega-Pascalů.

Pro vyvození takového Hertzova tlaku bude vzorek přitlačován na disk silou  $F_n = 30 \text{ N}$ . Na disk bude nanášena silná vrstva maziva, aby byl kontakt v průběhu celého experimentu plně zaplavený použitým mazivem. Skleněný disk s chromovou vrstvou bude upnut na rotačním modulu tribometru, což umožní změnu kluzné rychlosti v rozsahu (0,000 1 až 0,022)  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tyto rychlosti odpovídají otáčkám (0,2 až 30) rpm.

Pro každý typ vzorku bude provedena série experimentů s různými kluznými rychlostmi. Experiment spočívá v zatížení vzorku a roztočení disku danými otáčkami. Otáčky se v rozmezí (0,2 až 1) rpm budou zvyšovat s krokem 0,1 rpm, v rozmezí (1 až 20) rpm s krokem 1 rpm a v rozmezí (20 až 30) rpm s krokem 5 rpm. Po ustálení koeficientu tření bude na příslušné rychlosti setrváno 20 sekund. Během této doby bude kontaktní oblast snímána vysokorychlostní kamerou.

### 4.4 Způsob vyhodnocování

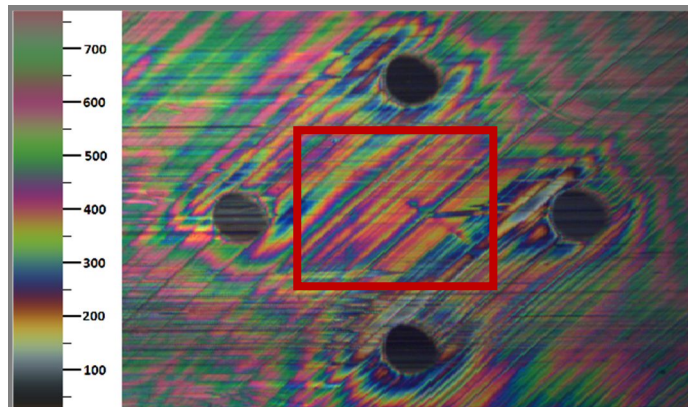
Z těchto testů bude získán průběh tření v závislosti na čase. Z těchto dat bude vybrán vyhodnocovaný úsek po ustálení kluzné rychlosti, resp. třecí síly (Obr. 4-9).



Obr. 4-9 Průběh koeficientu tření v závislosti na čase



Z interferogramů zachycených kamerou bude získána tloušťka mazacího filmu v oblasti mezi buňkami textury (Obr. 4-10). Měřítko barevného spektra tloušťky mazacího filmu je získáno z kontaktu ocelové kuličky a skla s mazivem použitým v experimentech.



**Obr. 4-10** Interferogram texturovaného vzorku

Pro hladké vzorky bude tloušťka mazacího filmu porovnána s teoretickou predikcí vypočtenou pomocí vztahů (1-7). Koeficient tření a tloušťka filmu všech typů vzorků budou porovnány mezi sebou a z výsledků bude určen vliv povrchových úprav. Z interferogramů bude popsán způsob utváření mazacího filmu v kontaktu a v buňce textury.

## 5 VÝSLEDKY

5

Tématem této práce je utváření mazacího filmu v konformním kontaktu skleněného disku a texturovaného vzorku. Test spočívá v měření koeficientu tření z třecí a normálové síly při otáčení disku a v měření tloušťky mazacího filmu pomocí optické interferometrie. V této kapitole je popsán výpočet predikované tloušťky mazacího filmu pro hladký kontakt. Získané hodnoty jsou porovnány s naměřenými daty, a tím je potvrzena vhodnost dané konfigurace. Dále jsou v této části práce popsány získané výsledky z experimentů s texturovanými vzorky v souladu s předchozí kapitolou. Z těchto výsledků je určen vliv povrchových úprav na tvorbu mazacího filmu.

### 5.1 Určení režimu mazání

5.1

Pro určení režimu mazání byla použita mapa kapalinových režimů uvedená v kapitole 2.2, kdy tyto vztahy platí v hydrodynamickém mazání a lze je využít i v kontaktu konformním. Hlavním předpokladem pro izoviskozně-tuhý režim mazání, resp. hydrodynamické mazání, je velmi nízký kontaktní tlak, a to v rozmezí (1 až 50) MPa, dle [5]. V experimentální části této práce se jedná o konformní kontakt s vysokým stupněm lokální konformity, kdy poloměr zakřivení  $R_x = R_y = 12$  m. Při znalosti materiálových a geometrických vlastností kontaktních těles a velikosti zatížení lze vypočítat Hertzův kontaktní tlak dle vztahu:

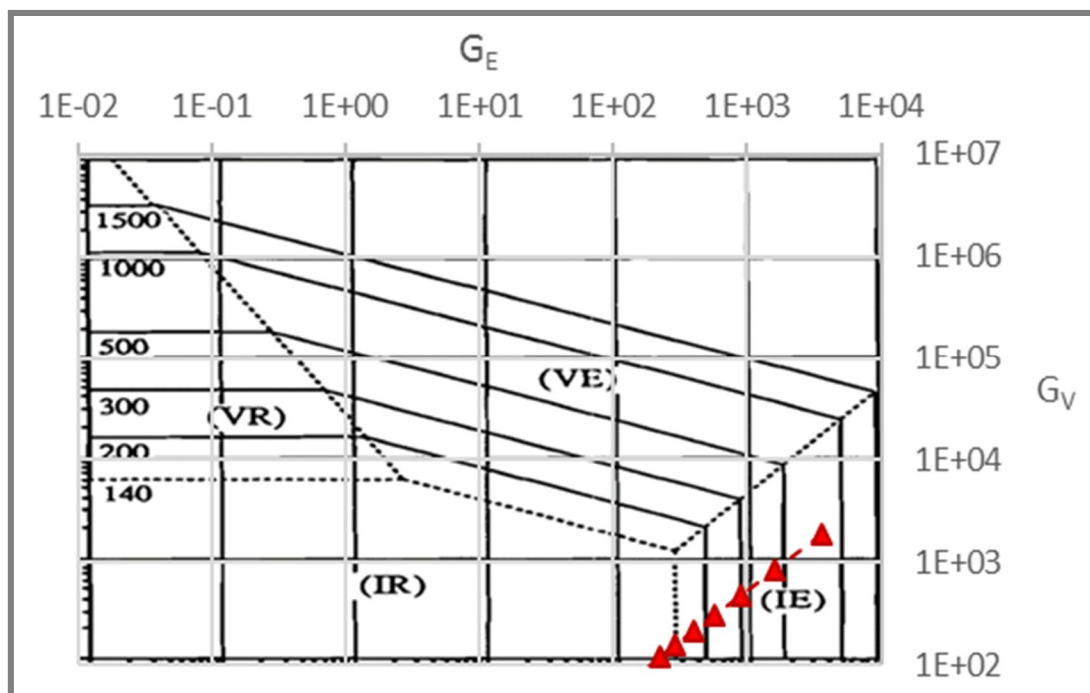
$$p_h = \frac{3F_n}{2\pi ab} \quad (6)$$

kde:

$F_n$	N	zatížení
$a, b$	m	rozměry kontaktní oblasti

Ve vztazích pro výpočet rozměrů kontaktní oblasti vystupují parametry elipticity, zjednodušený eliptický integrál, redukovaný Youngův modul, redukovaný poloměr křivosti a zatížení, kdy výsledný rozměr kruhového otisku je  $a = b = 1,65$  mm, což odpovídá kontaktnímu tlaku  $p_h = 5,2$  MPa. Tento tlak je velmi malý, aby zvýšil viskozitu maziva nebo značně změnil kontaktní geometrii, což odpovídá režimu izoviskozně-tuhému. Pro určení režimu mazání, ale také pro výpočet tloušťky mazacího filmu, je třeba vypočítat základní bezrozměrné parametry zatížení  $W$ , rychlosti  $U$  a materiálu  $G$ , které dále vystupují ve vztazích pro bezrozměrné parametry viskozity  $g_V$  (4) a elasticity  $g_E$  (5).

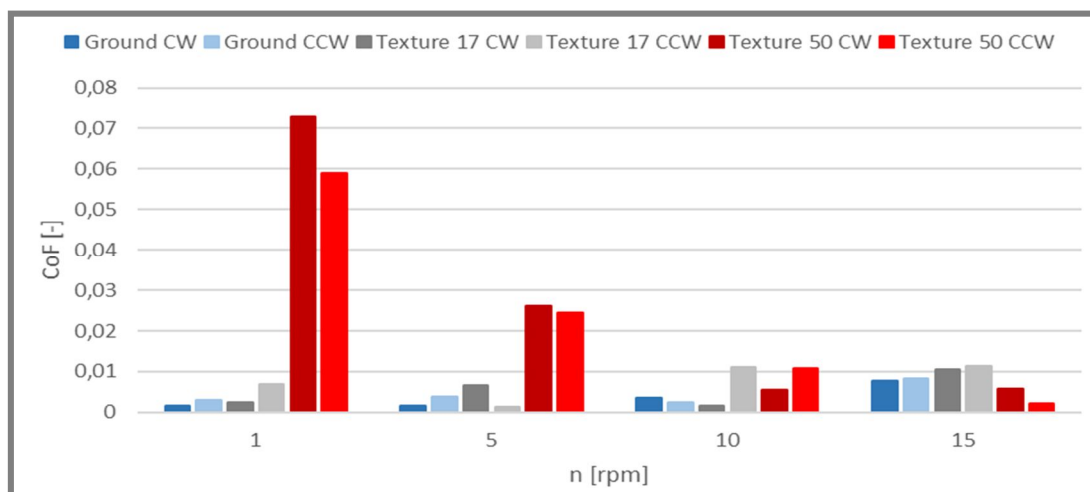
Pomocí těchto vztahů lze pro jednotlivé kluzné rychlosti určit režim mazání. Pro parametry experimentů použitých v této práci je mapa režimů vidět v grafu na Obr. 5-1. Na hranici režimů izoviskozně-elastického a izoviskozně-tuhého je bod odpovídající otáčkám disku  $n = 0,7$  rpm, resp.  $u = 0,5$  mm·s<sup>-1</sup>. Všechny vyšší testované kluzné rychlosti spadají do hydrodynamického mazání.



Obr. 5-1 Mapa režimů mazání hladkého vzorku

## 5.2 Vliv textury na koeficient tření

K ověření způsobilosti zařízení pro měření tření v experimentech popsanych v předchozí kapitole byly provedeny testy ve směru otáčení hodinových ručiček (CW) a po skončení testu ve stejné konfiguraci proti směru otáčení hodinových ručiček (CCW). Porovnání naměřených hodnot koeficientu tření pro všechny typy vzorků - hladký, texturovaný kontakt s denty hlubokými 17  $\mu\text{m}$  (dále jen „Textura 17“) a texturovaný kontakt s denty hlubokými 50  $\mu\text{m}$  (dále jen „Textura 50“) jsou v grafu na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Porovnání koeficientů tření pro směry CW a CCW



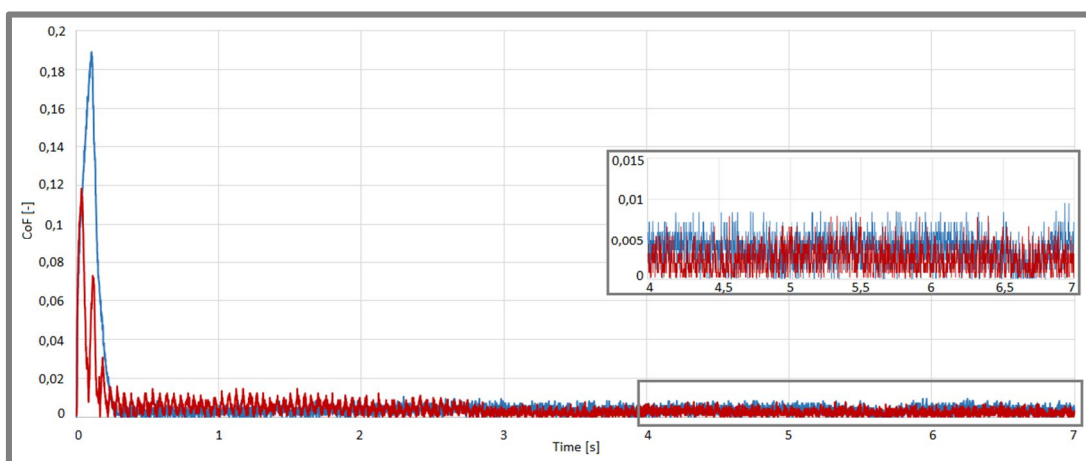
Z grafu vyplývá, že výsledné hodnoty koeficientu tření jsou velmi nestabilní, přičemž naměřená hodnota koeficientu tření je u textur 50 až 8x větší než v případě ostatních typů vzorků.

Pro rychlost otáčení 15 rpm jsou výsledky nejstabilnější, odchylka hladkého vzorku a vzorku s texturou 17 je 8 %. U rychlosti 10 rpm se však naměřená data pro opačné směry liší až o jeden řád (textura 17 – CW: 0,0016; CCW: 0,011). Průměrná hodnota koeficientu tření pro jednotlivé vzorky je v Tabulce 3.

Tab. 3 Průměrná hodnota koeficientu tření

Povrch vzorku	Koeficient tření [-]
Hladký	0,007 6
Textura 17	0,007 3
Textura 50	0,021 5

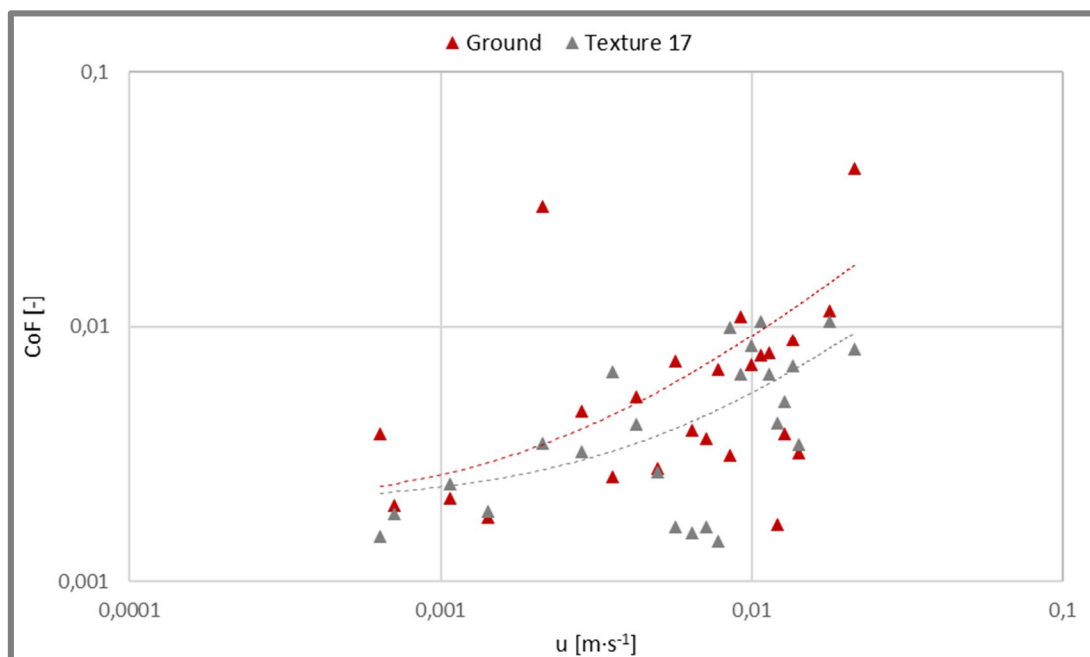
Teoretickým předpokladem je, že trend změny koeficientu tření se zvyšující se kluznou rychlostí odpovídá Stribeckově křivce pro hydrodynamický režim mazání, tzn. že koeficient tření s rostoucí kluznou rychlostí rovněž roste (viz Obr. 2-1). Tomu odpovídají data pro hladký vzorek a pro vzorek s texturou 17. Nejvyšší vliv mělkých dentů, textury 17 v této práci, na snížení koeficientu tření by měl být v oblasti elasto-hydrodynamického mazání. Tato skutečnost se nejvíce projevila pro rychlost otáčení  $n = 0,9$  rpm ( $u = 0,000\ 6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), kdy došlo k poklesu koeficientu tření o 61 % v porovnání s hladkým vzorkem. Ze získaných dat bylo možné sledovat i vliv hluboké textury, textury 50, který byl viditelný pro hydrodynamický režim u rychlostí otáčení v rozmezí (9 až 13) rpm,  $(0,06 - 0,09)\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V porovnání s hladkým vzorkem došlo u textury 50 při rychlosti otáčení  $n = 9$  rpm k poklesu tření o 64 %. Hodnoty koeficientů tření pro texturu 50 jsou však v celém spektru hodnot velmi variabilní, což je vidět již z Tab. 3.



Obr. 5-3 Průběh koeficientu tření vzorku s texturou 17 při  $u = 0,9$  rpm

Ze získaných dat je však viditelné ovlivnění průběhu jednotlivých koeficientů tření texturami. U texturovaných vzorků je průběh koeficientu tření v závislosti na čase ustálenější a v případě textury 17 při  $u = 0,9$  rpm je výchylka v ustáleném stavu o 12 % menší, než je tomu u vzorku s hladkým povrchem. Na Obr. 5-4 je závislost koeficientu tření na kluzné rychlosti (Stribeckova křivka) pro dva typy vzorků, hladký a s texturou

17, v logaritmických souřadnicích. Data pro vzorek s texturou 50 do grafu nebyla z důvodu jejich variability a hodnotám výrazně odlišným od ostatních dat zahrnuta.



Obr. 5-4 Závislost koeficientu tření na kluzné rychlosti

Výše zobrazený graf ukazuje vliv textury na koeficient tření při změně kluzné rychlosti v rozsahu (0,000 5 až 0,02) m·s<sup>-1</sup> při zatížení 30 N. Z grafu je patrný nárůst koeficientu tření se zvyšující se kluznou rychlostí u obou typů vzorků. Data jsou proložena lineární spojnici trendu, která ukazuje, že hodnoty koeficientu tření pro texturovaný vzorek jsou znatelně rozdílné, což ukazuje vliv texturování kontaktního povrchu na velikost tření v hydrodynamickém režimu mazání.

### 5.3 Tloušťka mazacího filmu stanovená teoreticky

Pro teoretické určení tloušťky mazacího filmu je vhodné využít vztahu Moese, který je v odborné literatuře často využíváný a poskytuje dostatečný soulad mezi experimentálními a teoretickými hodnotami [33]. Moesův vztah pro výpočet bezrozměrné tloušťky mazacího filmu:

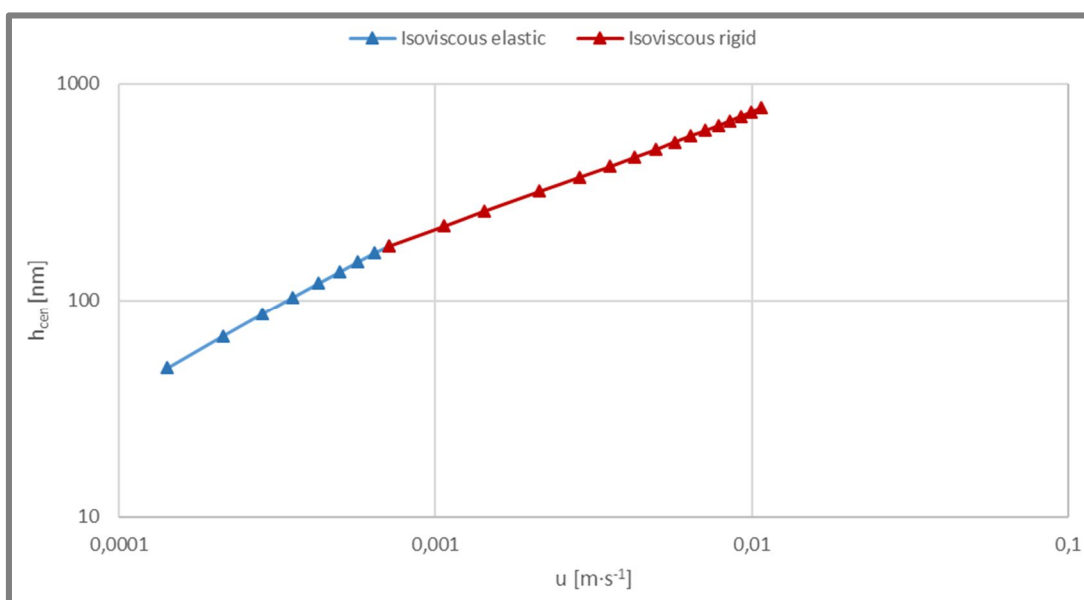
$$\tilde{H}_{cen} = \left[ \left\{ (1,70 \cdot M^{-1/9} \cdot L^{3/4} \cdot t)^r + (1,96 \cdot M^{-1/9})^r \right\}^{s/r} + (47,3 \cdot M^{-2})^s \right]^{1/s} \quad (7)$$

kde:

$M$       bezrozměrný parametr zatížení  
 $L$       bezrozměrný parametr materiálu  
 $r, s, t$     bezrozměrné parametry, kdy:

$$r, s, t = f(L, M)$$

Predikovaná tloušťka mazacího filmu pro izoviskozně-elastický a pro izoviskozně-tuhý režim mazání je v grafu na Obr. 5-5. V experimentální části této práce byla využívána metoda optické interferometrie, jejíž měřitelný rozsah tloušťky mazacího filmu je (0 až 800) nm. Přepočtem z bezrozměrného parametru tloušťky filmu je teoretická tloušťka filmu  $h = 785$  nm, pro otáčky disku  $n = 15$  rpm, resp.  $u = 0,01$  mm·s<sup>-1</sup>. Tloušťka mazacího filmu byla proto vyhodnocována v rozsahu (0,2 – 15) rpm.



Obr. 5-5 Teoretická tloušťka mazacího filmu

## 5.4 Tloušťka mazacího filmu stanovená experimentálně

5.4

Hodnoty jednotlivých barev experimentální tloušťky mazacího filmu byly získány na základě kontaktu ocelové kuličky a skleněného disku s užitím maziva FVA3. Program *Achilles* na základě snímku kontaktu vyhodnotil barevné spektrum, kde každá barva odpovídá rozdílné tloušťce mazacího filmu.

Ze sekvenčních snímků kontaktní oblasti zachycených vysokorychlostní kamerou byla vyhodnocena samotná tloušťka mazacího filmu v Hertzově oblasti. Vyhodnocení probíhalo na základě porovnání barevného spektra tlouštěk mazacího filmu se snímky odpovídajícími jednotlivým typům vzorků a příslušným klzným rychlostem.

## 5.5 Porovnání teoretické a experimentální tloušťky mazacího filmu

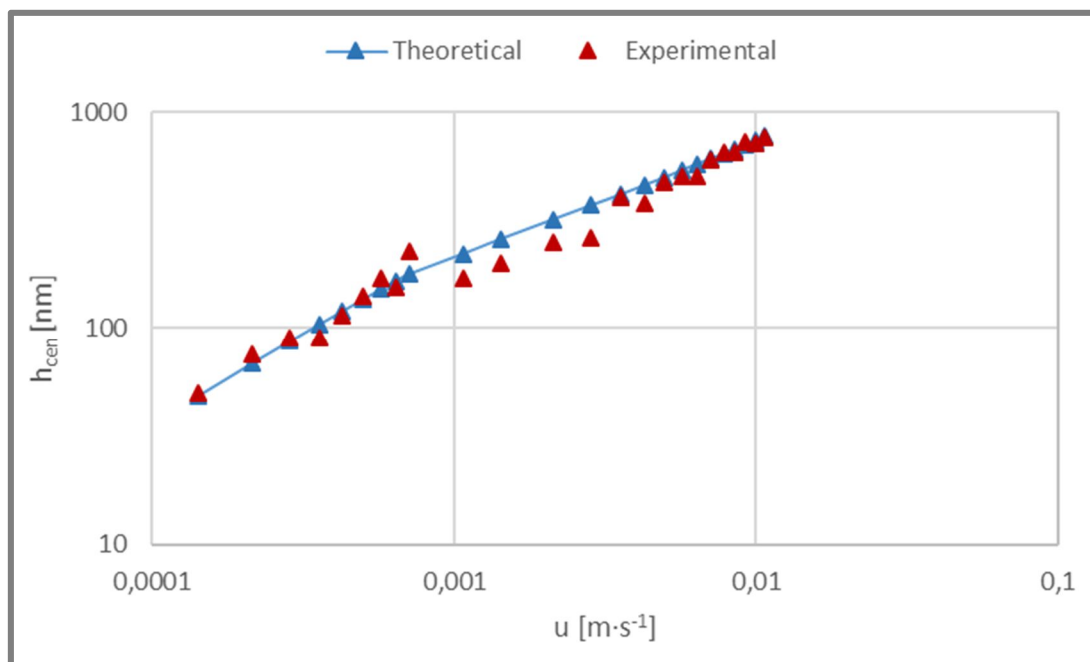
5.5

### 5.5.1 Tloušťka mazacího filmu hladkých vzorků

5.5.1

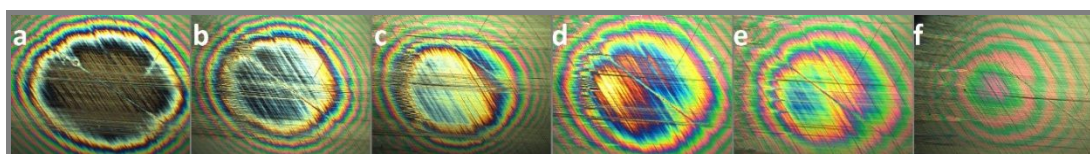
Hodnoty predikované a experimentální tloušťky mazacího filmu pro hladký vzorek jsou v grafu na Obr. 5-6. Obecně platí, že se zvyšující se klznou rychlostí se tloušťka mazacího filmu také zvětšuje. Z výsledků je patrná shoda teoretických a experimentálních dat v izoviskozně-elastickém režimu. V režimu izoviskozně-tuhém je u experimentálně získaných dat zachován trend odpovídající datům vypočteným, nicméně tato data se od teoretických liší. Tyto odchylky jsou způsobeny především zvolenou vyhodnocovací metodou, avšak mohou být rovněž ovlivněny parametry experimentů, jako je například zatížení nebo geometrické vlastnosti

použitých zařízení. Zatížení je u tribometru *Rtec* prováděno pružinou přes zatěžující rameno, kdy natočení pružiny mohlo ovlivnit vyvozenou normálovou sílu. Tato skutečnost ve spojení s geometrickými nedokonalostmi jako je házení, které bylo viditelné při zvyšujících se kluzných rychlostech, rovněž mohla mít vliv na experimentálně získanou tloušťku mazacího filmu.



Obr. 5-6 Teoretická a experimentální tloušťka mazacího filmu pro hladký vzorek

Pro data z grafu 5-6 byla vypočtena směrodatná odchylka, která je 15 nm. To odpovídá 1,6 % celého barevného spektra tlouštěk mazacího filmu, což je při získání hodnot porovnáním spektra a snímků přijatelná hodnota.



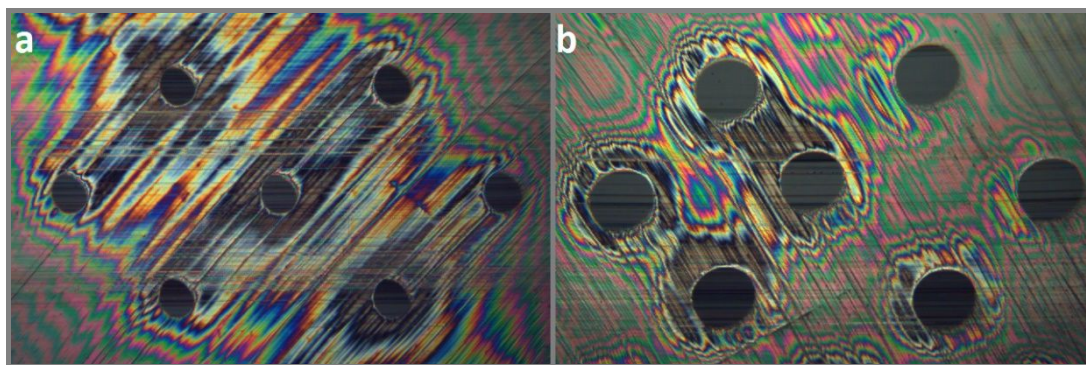
Obr. 5-7 Experimentální tloušťka mazacího filmu hladkého vzorku

Na Obr. 5-7 jsou jednotlivé interferogramy hladkého vzorku pro kluzné rychlosti (0,4; 1; 2; 4; 10) rpm (Obr. 5-7 b-f) a pro statický kontakt (a). Tento obrázek ukazuje přechod mezi izoviskózně-elastickým a izoviskózně-tuhým režimem mazání. U rychlosti otáčení 1 rpm je ještě patrná podkova typická pro elasto-hydrodynamické mazání. Se zvyšující se rychlostí rozpoznatelnost tohoto jevu klesá.

## 5.6 Vliv textury na tloušťku mazacího filmu

Na Obr. 5-8 je statický kontakt vzorku s texturou 17 (a) a s texturou 50 (b) při zatížení  $F_n = 30$  N. Z obrázku je vidět, že po předešlém broušení a leštění došlo u vzorku s texturou 17 zcela k odstranění valu vytlačeného materiálu. U textury 50 je val materiálu stále viditelný, nicméně z hlediska konformity vzorku a počtu dentů v kontaktu byla kontaktní oblast považována za dostatečnou.

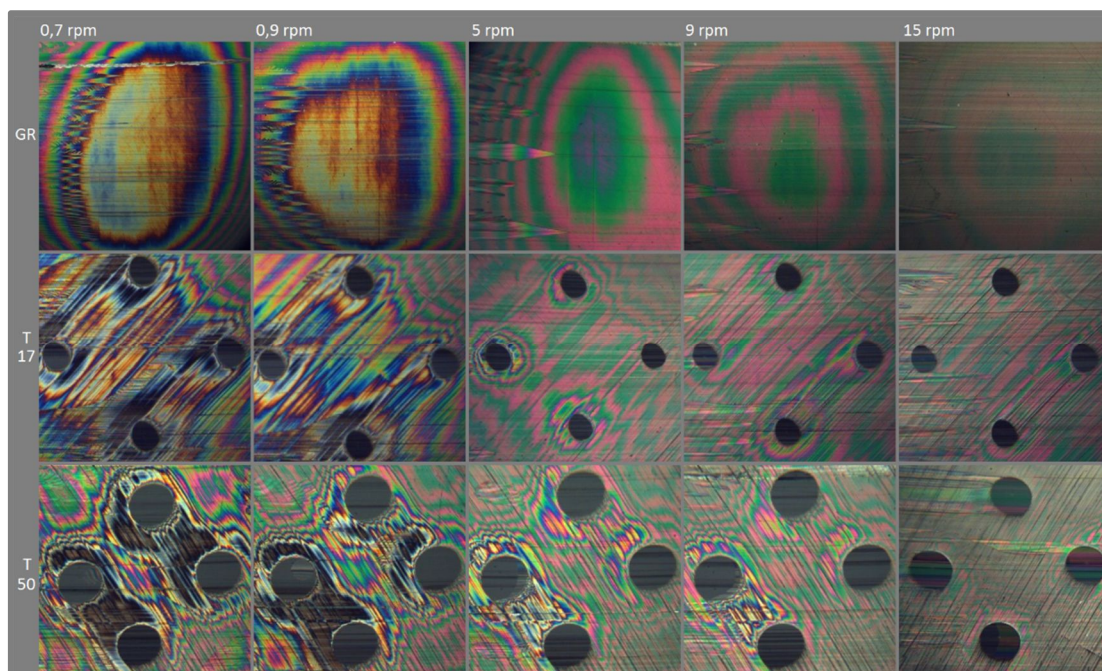




Obr. 5-8 Statický kontakt, a – textura 17, b – textura 50

Na obrázku 5-9 jsou interferogramy všech tří typů vzorků, hladkého (1. řádek), texturovaného s denty hlubokými 17  $\mu\text{m}$  (2. řádek) a texturovaného s denty o hloubce 50  $\mu\text{m}$ , pro různé rychlosti otáčení, resp. (0,000 5 až 0,011)  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

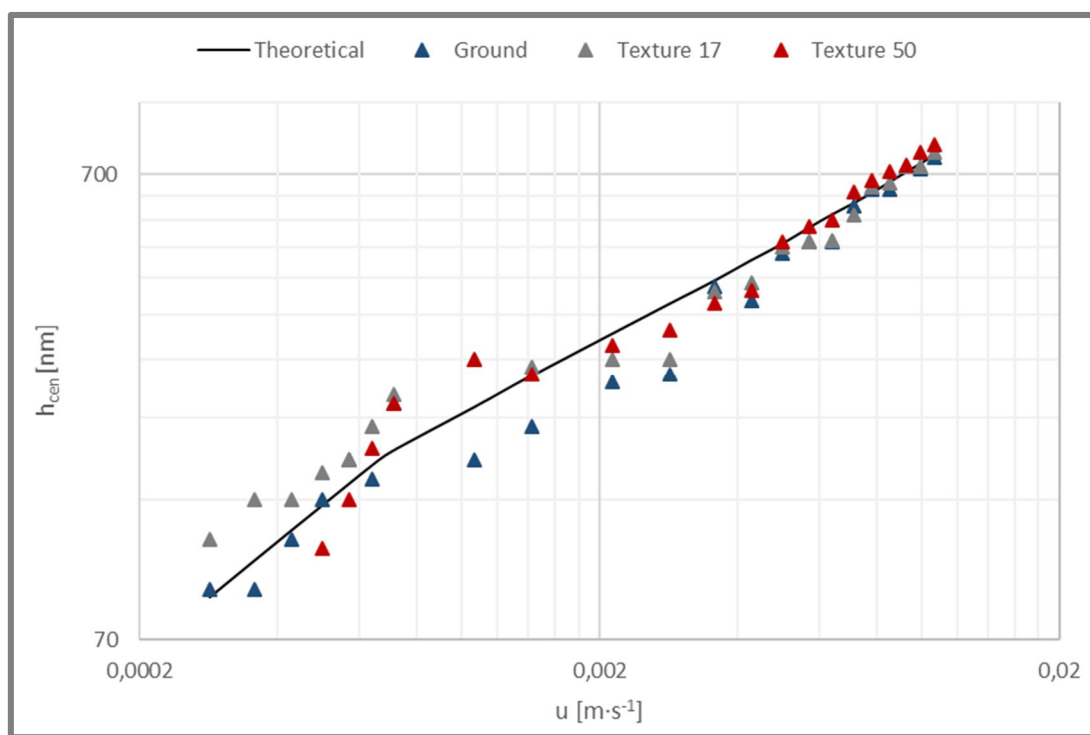
První dvě rychlosti představují režim izoviskozně-elastický. Textura 50 v tomto režimu znatelně snižovala tloušťku filmu. Důvodem byla velká hloubka a průměr buněk textury. Se zvyšující se plošnou hustotou textury dochází ke zvýšení kontaktního tlaku a zejména při malých kluzných rychlostech k snížení tloušťky filmu. U textury 17 byl při rychlosti otáčení  $n = 0,9$  rpm zaznamenán největší vliv na zvýšení tloušťky mazacího filmu oproti vzorku hladkému. Tento rozdíl je v oblasti mezi buňkami textury v rozmezí (40 až 50) nm. U textury 50 byl největší nárůst tloušťky mazacího filmu ve srovnání s hladkým vzorkem pozorován při rychlosti otáčení  $n = 9$  rpm. Tento nárůst byl zhruba 60 nm. Při rychlosti otáčení  $n = 5$  rpm, resp.  $n = 15$  rpm je tloušťka filmu u všech tří typů vzorků srovnatelná, a to v rozmezí (370 až 400) nm, resp. (770 až 810) nm.



Obr. 5-9 Snímky jednotlivých vzorků při různých rychlostech otáčení

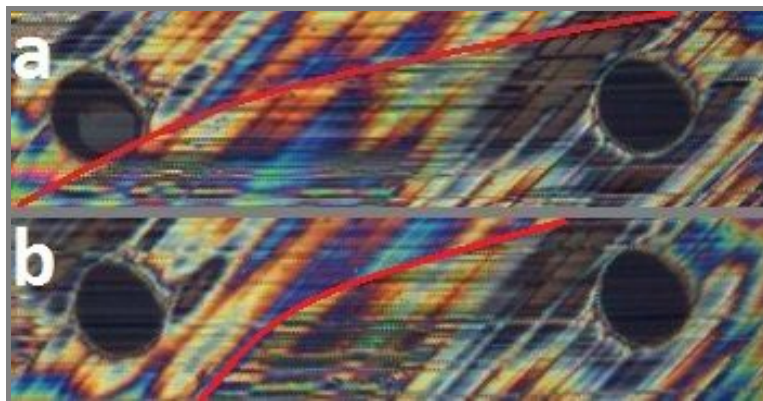
V grafu na Obr. 5-10 jsou vidět rozdíly experimentálních tloušťek mazacího filmu pro hladký vzorek a pro vzorky s texturou 17 a s texturou 50.

V izoviskozně-elastické oblasti dochází u texturovaných vzorků k mnohem prudšímu nárůstu tloušťky mazacího filmu se zvyšující se kluznou rychlostí, avšak trend lineárního nárůstu je totožný s predikcí. Nejvyšší tloušťku mazacího filmu vykazují v tomto režimu textury 17, kdy oproti hladkým vzorkům došlo k jejímu zvýšení až o 56 % ( $n = 0,5$  rpm, resp.  $u = 0,0004 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) z  $h = 90 \text{ nm}$  na  $h = 140 \text{ nm}$ . Tento jev je způsoben objemem maziva vtahovaného do kontaktu, kdy u texturovaných vzorků jsou při plně zaplavených podmínkách všechny buňky textury zaplněny mazivem. Na rozhraní režimů elasto-hydrodynamického a hydrodynamického jsou hodnoty tloušťek mazacího filmu pro texturu 17 a texturu 50 srovnatelné. Gradient nárůstu tloušťky mazacího filmu je však v tomto režimu mazání nejvyšší u textury 50, téměř dvakrát větší než u vzorku hladkého, což předurčuje textury s hlubšími denty k vykazování vyšších tloušťek mazacího filmu v hydrodynamickém mazání.



Obr. 5-10 Experimentální tloušťka mazacího filmu jednotlivých typů vzorků

V izoviskozně-tuhém režimu mazání je trend texturovaných a hladkých vzorků srovnatelný. U texturovaných vzorků je však viditelný nárůst tloušťky mazacího filmu. Tento nárůst je v průměru vyhodnocených hodnot v hydrodynamickém mazání 5 % u textury 17 a 8 % u textury 50. U rychlostí otáčení (1,5 až 3) rpm je vliv textury 17 a textury 50 na tloušťku filmu téměř identický, kdy její zvýšení je v rozmezí (15 až 30) %. Se zvyšující se kluznou rychlostí v hydrodynamickém mazání roste vliv velikosti důlku na tloušťku filmu. Velikost tloušťky filmu u rychlostí otáčení vyšších než 3 rpm byla nejvyšší u vzorků s texturou 50, a to o (6 až 13) % oproti hladkému vzorku.



Obr. 5-11 Rozsah kavitace

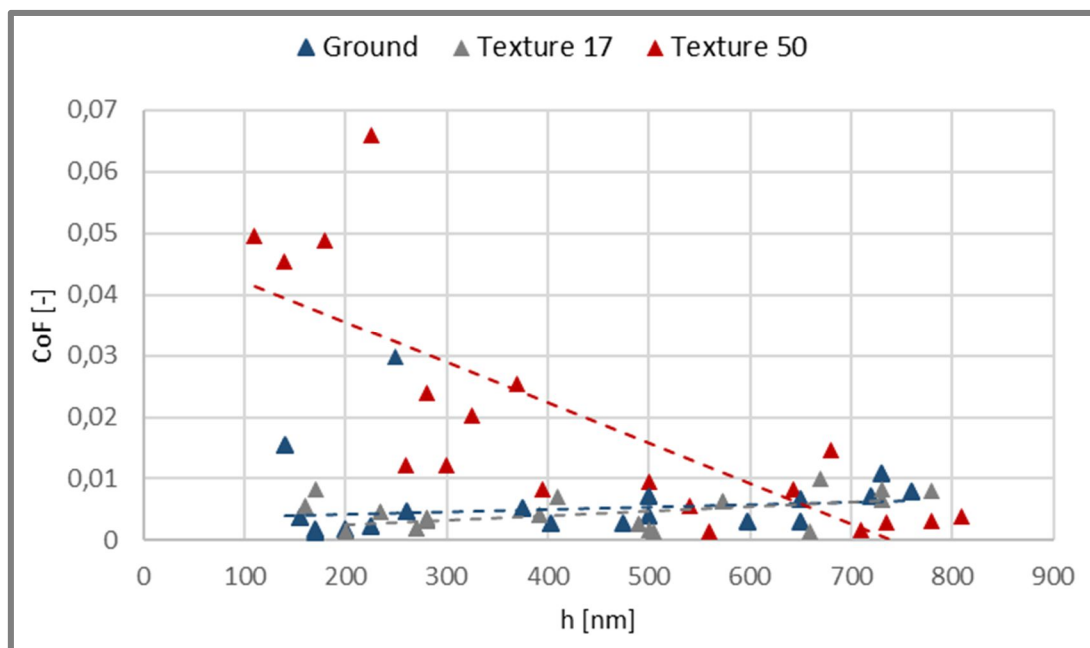
Vliv velikosti důlku spočíval, stejně jako v případě izoviskozně-elastického mazání, v množství maziva vtahovaného do kontaktu, ale také ve vzniku hydrodynamického zdvihu na okrajích důlků. Na okrajích důlků byl pozorován vznik kavitace, která (Obr. 5-11 a) zasahovala až k dalším důlkům textury a způsobovala jejich hladovění, čímž se lokálně, zejména za důlky, tloušťka filmu zvýšila. Během zvyšování kluzné rychlosti se mezera mezi kontaktními povrchy, resp. tloušťka mazacího filmu, v oblasti mezi buňkami textur zvětšovala, čímž se kavitace zmenšovala a sahala pouze do oblasti mezi buňkami textury (Obr. 5-11 b). Tloušťka filmu byla v tomto případě v oblasti kavitace nižší o (0 až 30) nm, avšak za touto oblastí vyšší o přibližně 40 nm. Tento jev zcela neodpovídá teoretickým předpokladům, kdy se zvyšující se kluznou rychlostí roste i míra kavitace. Tento jev byl ovlivněn zejména množstvím maziva dodávaného do kontaktu právě z dentů a také mírou inklinace kontaktu. Z toho vyplývá, že geometrie buněk textury, zejména hloubka a průměr dentu, znatelně ovlivňují prospěšné vlastnosti textur na tloušťku mazacího filmu.

### 5.6.1 Vliv tloušťky mazacího filmu na koeficient tření

5.6.1

V grafu na Obrázku 5-12 je závislost koeficientu tření na tloušťce mazacího filmu pro rychlosti otáčení v rozmezí (0,7 až 15) rpm. Tato lineární závislost je pro vzorek s hladkým povrchem téměř konstantní, kdy se zvyšující se tloušťkou mazacího filmu roste nepatrně i koeficient tření, což odpovídá části Stribeckovy křivky pro hydrodynamický režim mazání. Pro vzorky s texturovaným povrchem je tato závislost daná jejich geometrií, resp. vlivem textury, v daném režimu mazání, kdy tloušťka mazacího filmu rostla lineárně v závislosti na kluzné rychlosti. Mělké denty textury 17 vykazovaly nízké (0,005 až 0,009) tření v izoviskozně-elastickém režimu mazání, při relativně nízké (160 nm až 235 nm) tloušťce mazacího filmu. Tato tloušťka však v tomto režimu byla u textur 17 o (14 až 56) % vyšší než v případě hladkých vozrků. V izoviskozně-tuhém režimu mazání je průběh závislosti koeficientu tření na tloušťce mazacího filmu u vzorku s texturou 17 podobný jako u vzorku s hladkým povrchem. Vzorek s texturou 50 naopak v izoviskozně-elastickém režimu vykazoval koeficient tření  $\pm 0,05$  při velmi malé (110 nm až 225 nm) tloušťce mazacího filmu. Pozitivní vliv této textury na tloušťku mazacího filmu byl až při vyšších kluzných rychlostech v hydrodynamickém mazacím režimu, kdy rovněž došlo i k postupnému snížení velikosti koeficientu tření.



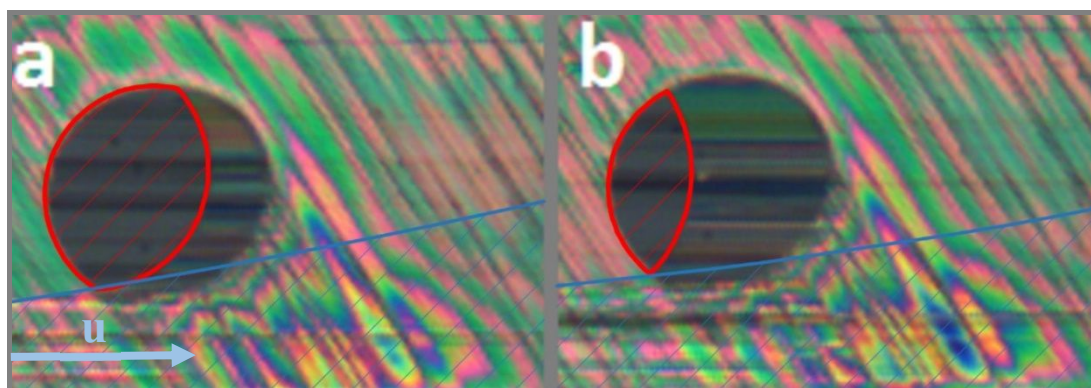


Obr. 5-12 Závislost koeficientu tření na tloušťce mazacího filmu

### 5.7 Utváření mazacího filmu v texturovaném kontaktu

Pro detailní pozorování utváření mazacího filmu sloužily videa, resp. jednotlivé snímky, z vysokorychlostní kamery.

Největší vliv na tloušťku mazacího filmu byl u vzorku s texturou 17 zaznamenán při rychlosti otáčení  $n = 0,5$  rpm. Obraz kontaktu byl po celou sledovanou dobu stabilní s viditelnou kavitací, která neovlivňovala ostatní denty. Na ploše ovlivněné kavitací byl rozpoznatelný pokles tloušťky mazacího filmu o přibližně 20 nm oproti místu za touto oblastí. U plně zaplaveného kontaktu a nízkých rychlostí byly denty po celou dobu experimentu plny maziva.



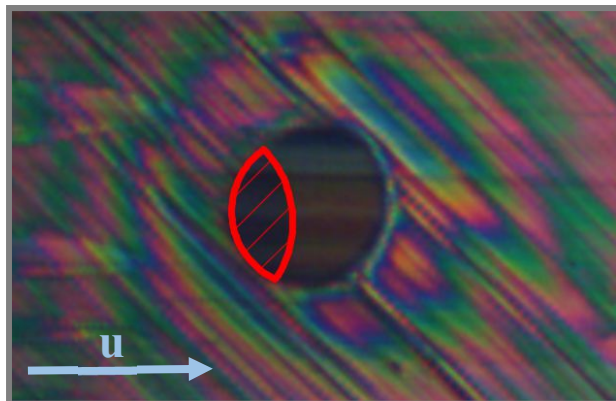
Obr. 5-13 Hladovění dentu v důsledku kavitace

U vyšších rychlostí, např. u textury 50 – 16 rpm (Obr. 5-13), docházelo v případě průchodu kavitace (oblast kavitace znázorněna modrými šrafy) dentem z důvodu změny inklinace způsobené fluktuací kontaktu (házení disku znatelné u rychlostí otáčení vyšších než 5 rpm) ke hladovění dentu. Kavita z dentu vytlačovala mazivo, kdy za dentem došlo k lokálnímu navýšení tloušťky maziva do doby, než z dentu bylo



všechno vyčerpáno. Tento nárůst tloušťky mazacího filmu byl v rozmezí (30 až 60) nm v závislosti na rychlosti otáčení skleněného disku. Pokud kavitace přestala procházet dentem, došlo k opětovnému naplnění dentu mazivem.

Mazivo viditelně ulpívalo v oblasti dentu dle Obr. 5-14 (textura 17 – 5 rpm) u většiny testů jak textur 17, tak textur 50 pro různé kluzné rychlosti. Buňky textury v tomto případě sloužily jako zásobárna maziva.



Obr. 5-14 Lokální zadržení maziva v dentu

## 6 DISKUZE

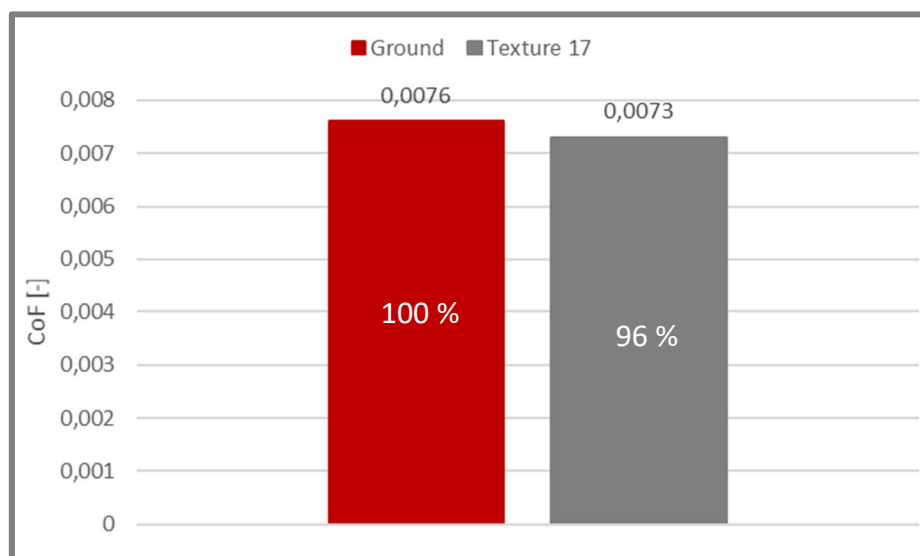
### 6.1 Režim mazání

K určení režimu mazání byla využita mapa kapalinových režimů pro bodový kontakt [3, 6, 9] za předpokladu, že se kontakt nachází v izoviskozně-tuhém režimu mazání. Otisk kontaktu byl kruhového tvaru při teoretických rozměrech kontaktní oblasti  $a = b = 1,65$  mm. Experimentálně změřené rozměry kontaktní oblasti byly  $a = 1,59$  mm a  $b = 1,67$  mm, což odpovídá teoretickým hodnotám. Kontakt se jeví jako bodový, avšak při lokální konformitě vzorku  $R_x = R_y = 12$  m se jedná o kontakt konformní. Z těchto geometrických vlastností vzorku byl vypočítán Hertzův kontaktní tlak  $p_h = 5,2$  MPa. Velikost Hertzova tlaku je v rozmezí (1 až 50) MPa odpovídajícím hydrodynamickému, resp. izoviskozně-tuhému, režimu mazání dle [5].

### 6.2 Vliv textury na koeficient tření

Pro zkoumání vlivu textury na velikost koeficientu tření bylo vybráno uspořádání textury a geometrické parametry jejích jednotlivých buněk dle [12]. Optimální textura z této studie obsahuje síť důlků s plošnou hustotou  $S_p = 3$  % s poměrem hloubky ku průměru důlku 0,11. Tento poměr odpovídá i studii [22], proto jeden z testovaných vzorků v této práci měl tyto parametry. Důlky této textury byly mělké hluboké 17  $\mu$ m o průměru 160  $\mu$ m. Druhý typ texturovaného vzorku měl denty podstatně hlubší, hluboké 50  $\mu$ m o průměru 300  $\mu$ m, což odpovídá poměru  $h/d = 0,17$ .

Z naměřených dat nebylo viditelné tak markantní snížení koeficientu tření jako v případech [6, 12, 22], kdy v těchto pracích bylo dosaženo snížení tření až o 60 %. Takto vysokých hodnot snížení tření bylo dosaženo za hladovějících podmínek, kdy textury slouží jako sekundární zdroj maziva, čímž výrazně zvýší tloušťku mazacího filmu. Při plně zaplaveném kontaktu je snížení tření v řádu jednotek procent při zachování poměru  $h/d = 0,11$  až 0,14, což vychází ze studií [10, 13], kde v případě pozitivního efektu textury bylo dosaženo snížení tření o méně než 7 %. V případě experimentální části této práce je průměrné snížení tření díky textuře 4 %, což koresponduje s rešeršní studií dané problematiky.



Obr. 6-15 Průměrný koeficient tření pro hladký a texturovaný vzorek

Z grafu závislosti koeficientu tření na kluzné rychlosti (viz Obr. 5-4) je vidět zvyšování koeficientu tření se zvyšující se kluznou rychlostí, což odpovídá průběhu Stribeckovy křivky [3] v hydrodynamickém režimu mazání. Rovněž je patrné snížení tření texturovaného vzorku s denty hlubokými 17  $\mu\text{m}$  v porovnání s povrchem hladkého vzorku. Jak popisuje studie [34], se zvyšující se kluznou rychlostí a za plně zaplavených mazacích podmínek hraje parametr hloubky textury významnou roli, kdy větší hloubka textury vede ke znatelnějšímu poklesu koeficientu tření [21, 29]. Formování mazacího filmu je za vyšších kluzných rychlostí snazší, protože se zvětšuje mezera mezi třecími povrchy, a tím pádem i tloušťka mazacího filmu. Velikost koeficientu tření značně klesá díky vzniklému hydrodynamickému efektu v okolí dentů. Vhodnou optimalizací buněk textury a jejich uspořádání je možné dosáhnout vyššího stupně snížení tření v konformním kontaktu.

Nicméně k dosažení spolehlivých výsledků měření tření v konformním kontaktu je třeba tribometr *Rtec* osadit snímačem náležitým k rozsahu měřených sil. V konfiguraci použité v experimentech byla měřena třecí síla  $F_t < 2 \text{ N}$  snímačem s  $F_{\text{max}} = 1\,000 \text{ N}$ , poněvadž jiný k dispozici v době experimentu nebyl. Rovněž je třeba adekvátně volit tuhost pružiny, přes kterou je vyvozováno zatížení kontaktu. Podstatnou roli v měření tření hrála také přesnost výroby hřídele, na které byl upevněn skleněný disk, kdy při vyšších rychlostech otáčení bylo pozorováno házení disku.

### 6.3 Vliv textury na tloušťku mazacího filmu

6.3

Pro výpočet teoretických tlouštěk mazacího filmu v režimech určených mapou kapalinových režimů (kap. 6.1) byl použit vztah Moese [5, 8, 33], který vychází ze vztahů Hamrocka a Dowsona [1, 7, 9]. Tento vztah využívá k výpočtu bezrozměrný parametr zatížení, materiálu a doplňkové bezrozměrné parametry. Teoretické hodnoty tloušťky mazacího filmu byly porovnány s experimenty se vzorky s hladkým povrchem. Z výsledků porovnání, které je na Obr. 5-6 je viditelná shoda v izoviskozně-elastickém mazacím režimu. Pro hydrodynamické mazání je trend vypočtených a experimentálně získaných dat rovněž velmi podobný, s odchylkou 1,6 %. Pro zjištění vlivu textury na tloušťku mazacího filmu byly k teoretickým a experimentálním datům pro hladký vzorek přidána data vzorků s texturami.

#### 6.3.1 Textura s denty hlubokými 17 $\mu\text{m}$

6.3.1

V izoviskozně-elastickém mazacím režimu, v daných experimentech do rychlosti otáčení 1 rpm, vykazovaly vzorky s texturou 17 pozitivní vliv na tloušťku mazacího filmu. V porovnání s hladkým povrchem vzorku došlo ke zvýšení tloušťky filmu o 56 % při rychlosti otáčení  $n = 0,5 \text{ rpm}$  ( $u = 0,000\,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) z  $h = 90 \text{ nm}$  na  $h = 140 \text{ nm}$ . V izoviskozně-tuhém mazacím režimu byl vliv mělkých důlků postupně snižován a od rychlosti otáčení  $n = 5 \text{ rpm}$  ( $u = 0,003\,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) byl trend závislosti tloušťky mazacího filmu na kluzné rychlosti téměř totožný.

#### 6.3.2 Textura s denty hlubokými 50 $\mu\text{m}$

6.3.2

V oblasti elasto-hydrodynamického režimu mazání pro rychlosti otáčení  $n < 0,7 \text{ rpm}$  ( $u = 0,000\,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) byl u vzorků s texturou 50 pozorován negativní vliv na tloušťku mazacího filmu. Při těchto rychlostech docházelo k zadírání v důsledku hladovění kontaktu. Se zvyšující se kluznou rychlostí se vliv textury 50 na tloušťku mazacího filmu zvyšoval a v rozmezí (0,7 – 1) rpm byl zaznamenán více než dvojnásobný

gradient nárůstu tloušťky mazacího filmu oproti hladkému vzorku. V hydrodynamickém mazání byl v rozmezí (1,5 – 3) rpm vliv textury 50 na tloušťku filmu podobný jako u textury 17. S rostoucí kluznou rychlostí se však zvyšoval, kdy u rychlosti otáčení  $n = 9$  rpm ( $u = 0,006 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) došlo k největšímu nárůstu tloušťky filmu oproti hladkému vzorku, a to o 12 % z  $h = 500 \text{ nm}$  na  $h = 540 \text{ nm}$ .

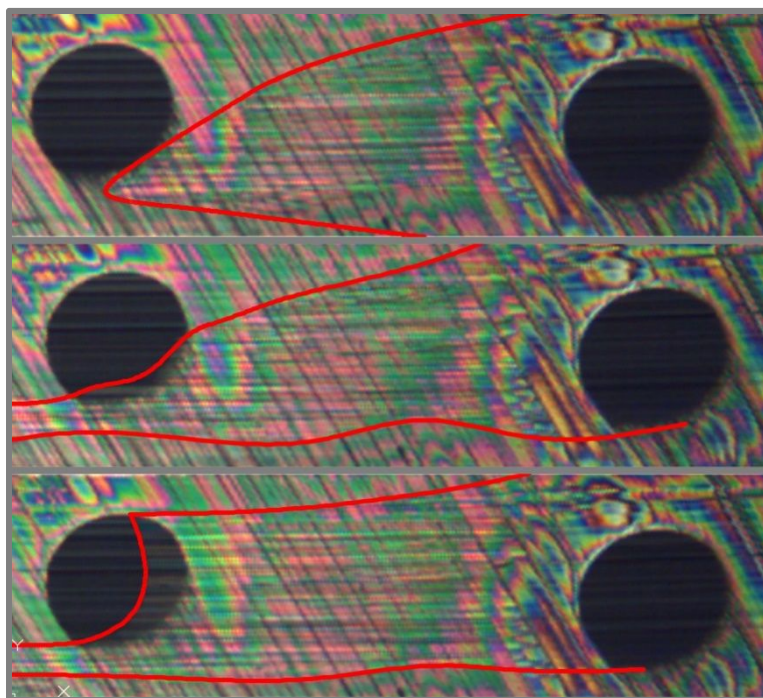
Za kluzných podmínek v izoviskozně-elastickém režimu mazání hluboké mikro kavity snižují tloušťku mazacího filmu v porovnání s hladkými vzorky, což koresponduje s výsledky [24, 35]. Hluboké důlky mají za následek lokální snížení nebo dokonce kolaps mazacího filmu. Naopak mělké důlky v tomto režimu mají pozitivní vliv na tloušťku mazacího filmu. Zvýšení tloušťky mazacího filmu je způsobeno množstvím maziva vtahovaného do kontaktu, kdy buňky textury jsou za plně zaplavených mazacích podmínek zcela naplněny mazivem. Toto mazivo je pak vtahováno do kontaktu vlivem hydrodynamického efektu, který navíc působí i na okrajích důlků textury. Se zvyšující se kluznou rychlostí se zvyšuje i hydrodynamický efekt.

Konfigurace rovného disku a důlků zaplněných mazivem představuje konvergující-divergující mezeru, takže se očekává, že v přední oblasti důlku dojde k negativnímu poklesu tlaku. Na okrajích dentů tímto vzniká kavitace, která se s postupným zvyšováním rychlosti snižuje, což neodpovídá teoretickým předpokladům a [22, 35], kdy za určité kluzné rychlosti kavitace nevzniká, za zvyšující se rychlosti ano. Tato skutečnost je ovlivněna zejména objemem maziva dodávaného do kontaktu právě z dentů a také mírou inklinace kontaktu, kdy za oblastí Hertzova kontaktu vznikala kavitace dle teoretických předpokladů.

---

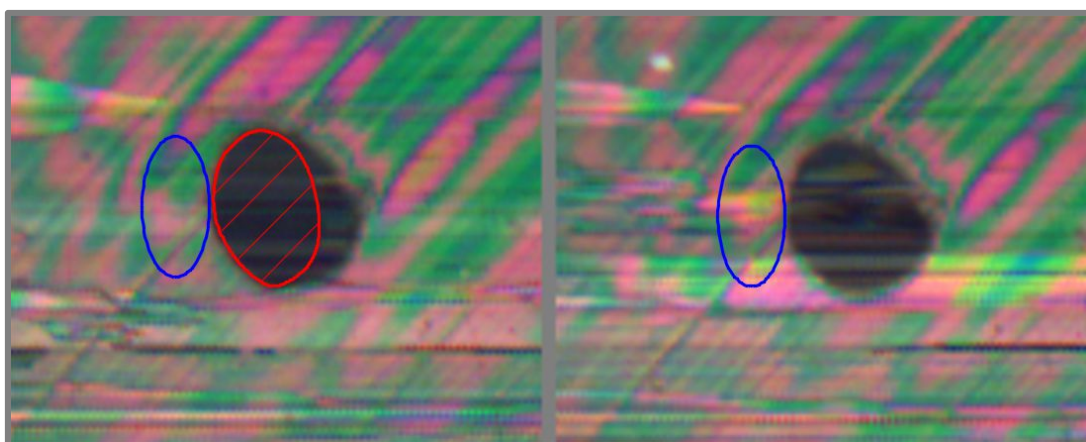
## 6.4 Utváření mazacího filmu v konformním texturovaném kontaktu

Kavitace ovlivňuje i utváření mazacího filmu v textuře a jejím okolí. V oblasti kavitace dochází k lokálnímu snížení tloušťky mazacího filmu v rozsahu (0 až 30) nm v závislosti na kluzné rychlosti a geometrii textury, především hloubce jejích jednotlivých buněk.



Obr. 6-2 Postupné vyčerpávání dentu (Textura 50, 11 rpm)

V případě, že oblast kavitace (Obr. 6-2 – ohraničení červenou čarou) zasahuje do další buňky textury, nastává vyčerpání maziva dané buňky, což vede ke zvýšení tloušťky mazacího filmu za touto buňkou. Na Obrázku 6-3 je vidět změna tloušťky filmu za buňkou textury. Toto zvýšení tloušťky filmu je pouze do doby, než je buňka zcela vyčerpána a není v ní další mazivo. Vlevo je vidět dent ještě zaplněný mazivem (červená oblast), kdy tloušťka filmu za ním je přibližně 370 nm. Vpravo je dent již zcela vyčerpán a v oblasti přímo za ním tloušťka mazacího filmu poklesla na zhruba 340 nm, tedy o 30 nm. V tomto případě slouží textury jako zásobárna maziva, tedy i v případě plně zaplaveného režimu mazání.



Obr. 6-3 Změna tloušťky filmu na buňkou textury po vyčerpání maziva

Se zvyšováním kluzné rychlosti se vliv důlkové geometrie na vznik kavitace zmenšuje. Důvodem je, že se zvyšováním kluzné rychlosti se mezera mezi kontaktními povrchy, resp. tloušťka mazacího filmu, v oblasti mezi buňkami textur zvětšuje, čímž se vliv jednotlivých buněk textury na vznik kavitace zmenšuje. Zvyšování kluzné rychlosti má za následek snadnější formování hydrodynamického zdvihu, což odpovídá práci [20]. Tím je do kontaktu vtahováno větší množství maziva a tím zvýšena tloušťka mazacího filmu. V plně zaplaveném režimu je vliv výrobních nedokonalostí textury nižší, nicméně důkladné odstranění valu materiálu vzniklého tvorbou textury vede ke snížení tření za nízkých kluzných rychlostí [15].



## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo popsání mechanismů ovlivňujících utváření mazacího filmu v texturovaných konformních kontaktech. Dílčí cíle byly především návržení a realizace implementace metody optické interferometrie na tribometr typu *pin-on-disc*, návržení a výroba texturovaných vzorků, realizace a vyhodnocení experimentů s těmito vzorky.

Z rešeršní části vyplynulo, že vlivem texturování povrchu se zabývaly stovky studií již od roku 1966, přičemž více než polovina z nich jsou práce teoretické. Zřejmě první úspěšná aplikace texturovaného povrchu byla provedena v roce 1986 na povrchu vložky válce ve spalovacím motoru. Již tato aplikace nasvědčovala tomu, že texturování za účelem zlepšení tribologických vlastností má větší význam u konformních kontaktů v důsledku větší kontaktní plochy k aplikování textur požadovaných rozměrů. Při návrhu textury, geometrie jednotlivých buněk, plošné hustoty atd., je třeba dbát na provozní podmínky součásti. Při špatné volbě těchto parametrů může mít textura dokonce negativní vliv na třecí vlastnosti kontaktu.

Pro dosažení primárního cíle této práce bylo třeba aplikovat metodu optické interferometrie na tribometr typu *pin-on-disc*. Byly navrženy přípravky pro upnutí vysokorychlostní kamery, skleněného disku a samotných testovaných vzorků. Pro sérii experimentů byly vyrobeny, dle poznatků vyplývajících z rešeršní části, tři typy vzorků – jeden s hladkým povrchem a dva s texturovaným povrchem o rozdílných parametrech buněk textury.

V experimentální části práce byl vyhodnocován koeficient tření a tloušťka mazacího filmu při konstantním zatížení, ale s proměnnou kluznou rychlostí. Hladký vzorek sloužil k ověření způsobilosti zařízení pomocí porovnání s teoretickou predikcí. Hlavní poznatky z výsledků experimentů s texturovanými vzorky jsou následující:

- mělké důlky ( $h/d \approx 0,11$ ) působí pozitivně na tloušťku mazacího filmu v oblasti elasto-hydrodynamického mazání, zatímco hluboké důlky ( $h/d > 0,13$ ) v tomto mazacím režimu způsobují až zadírání třecích povrchů v důsledku malého množství maziva v kontaktu a malého hydrodynamického zdvihu
- hluboké důlky působí pozitivně na tloušťku mazacího filmu v oblasti hydrodynamického mazání, mělké důlky ztrácí pozitivní účinek na tloušťku mazacího filmu s její zvětšující se velikostí
- kavitace způsobuje vyčerpání maziva z dentu, a tím snížení tloušťky mazacího filmu
- v případě vhodně zvolených rozměrů textury, v závislosti na provozních podmínkách, je možné tento vliv eliminovat

Přítomnost pole textur na povrchu vzorku ovlivnila tloušťku filmu pro celý rozsah kluzných rychlostí. Se zvýšením kluzné rychlosti se zvyšovala tloušťka maziva v závislosti na hloubce buněk textury. V hydrodynamickém mazání sloužily textury jako zásobárny maziva vytvářející doplňkový hydrodynamický zdvih.

V případě dalšího studia a výzkumu v oblasti této problematiky by bylo vhodné zajistit přesnější výrobu přípravku pro uchycení skleněného disku pro zamezení fluktuace kontaktu po disku. Další bodem pro dosažení přesnějších výsledků, zvláště v oblasti zjišťování vlivu textur na koeficient tření, je zajištění a aplikace snímače tření

s odpovídajícím měřicím rozsahem. Nicméně stěžejní se zdá být výroba textur na povrchu vzorku a samotná konformita součásti určené pro texturování. V plně zaplaveném režimu je vliv výrobních nedokonalostí nižší, avšak důkladné odstranění valu materiálu vzniklého tvorbou textury vede k dosažení spolehlivějších výsledků. Po zajištění těchto prerekvizit bude možné zkoumat vliv dalších parametrů, jako je například viskozita maziva, tvrdost materiálu vzorku a v neposlední řadě jednotlivé parametry textury.



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 0123970474.
- [2] STACHOWIAK, G. *Experimental methods in tribology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2004, xviii, 354 s. Tribology series. ISBN 0-444-51589-5.
- [3] HARTL, M. *Studium a měření velmi tenkých mazacích filmů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. 65 s. Habilitační práce.
- [4] HAMROCK, Bernard J., Steven R. SCHMID a Bo O. JACOBSON. *Fundamentals of fluid film lubrication*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, c2004. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 169. ISBN 0-8247-5371-2.
- [5] ESFAHANIAN, M. a B. J. HAMROCK. Fluid-Film Lubrication Regimes Revisited. *Tribology Transactions* [online]. 1991, **34**(4), 628-632 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1080/10402009108982081. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402009108982081>
- [6] MARX, Nigel, Johan GUEGAN a Hugh A SPIKES. Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry. *Tribology International* [online]. 2016, **99**, 267-277 [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.03.020. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X16300287>
- [7] HAMROCK B. J.-DOWSON D. *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part II -Ellipticity Parameter Results*. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineerings), Journal of Lubrication Technology, **98**, 1976, s. 375-383.
- [8] GOHAR, R. *Elastohydrodynamics*. 2nd ed. London: Imperial College Press, c2001. ISBN 1-86094-170-2.
- [9] KŘUPKA, I. *Studium elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů strojních soustav*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. 66 s. Habilitační práce.
- [10] GROPPER, Daniel, Ling WANG a Terry J. HARVEY. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. *Tribology International* [online]. 2016, **94**, 509-529 [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.10.009. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X15004582>
- [11] IBATAN, T., M.S. UDDIN a M.A.K. CHOWDHURY. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2015, **272**, 102-120 [cit. 2016-08-25]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.04.017. ISSN 02578972. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897215003400>
- [12] GALDA, L., J. SEP a S. PRUCNAL. The effect of dimples geometry in the sliding surface on the tribological properties under starved lubrication conditions. *Tribology International* [online]. 2016, **99**, 77-84 [cit. 2016-08-21]. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.03.015. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X16300093>

- [13] GACHOT, C., A. ROSENKRANZ, S.M. HSU a H.L. COSTA. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear* [online]. 2017, **372-373**, 21-41 [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1016/j.wear.2016.11.020. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164816307013>
- [14] MA, Chenbo a Hua ZHU. An optimum design model for textured surface with elliptical-shape dimples under hydrodynamic lubrication. *Tribology International* [online]. 2011, **44**(9), 987-995 [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.04.005. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X11000995>
- [15] JONES, Kyle a Steven R. SCHMID. Experimental Investigation of Laser Texturing and its Effect on Friction and Lubrication. *Procedia Manufacturing* [online]. 2016, **5**, 568-577 [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.047. ISSN 23519789. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235197891630052X>
- [16] UDDIN, M.S. a Y.W. LIU. Design and optimization of a new geometric texture shape for the enhancement of hydrodynamic lubrication performance of parallel slider surfaces. *Biosurface and Biotribology* [online]. 2016, **2**(2), 59-69 [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1016/j.bsbt.2016.05.002. ISSN 24054518. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405451816300113>
- [17] HAMILTON, D. B., J. A. WALOWIT a C. M. ALLEN. A Theory of Lubrication by Microirregularities. *Journal of Basic Engineering* [online]. 1966, **88**(1), 177- [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1115/1.3645799. ISSN 00219223. Dostupné z: <http://FluidsEngineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1432484>
- [18] WILLIS, Eric. Surface finish in relation to cylinder liners. *Wear* [online]. 1986, **109**(1-4), 351-366 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/0043-1648(86)90278-4. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164886902784>
- [19] LIEW, K.W., C.K. KOK a M.N. ERVINA EFZAN. Effect of EDM dimple geometry on friction reduction under boundary and mixed lubrication. *Tribology International* [online]. 2016, **101**, 1-9 [cit. 2016-09-02]. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.03.029. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X16300378>
- [20] WOS, Slawomir, Waldemar KOSZELA a Pawel PAWLUS. Determination of oil demand for textured surfaces under conformal contact conditions. *Tribology International* [online]. 2016, **93**, 602-613 [cit. 2017-01-24]. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.05.016. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X15002157>
- [21] MENG, Fanming, Rui ZHOU, Tiffany DAVIS, Jian CAO, Q.Jane WANG, Diann HUA a Jordan LIU. Study on effect of dimples on friction of parallel surfaces under different sliding conditions. *Applied Surface Science* [online]. 2010, **256**(9), 2863-2875 [cit. 2016-08-23]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.11.041. ISSN 01694332. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433209016304>
- [22] QIU, Mingfeng, Adis DELIC a Bart RAEYMAEKERS. The Effect of Texture Shape on the Load-Carrying Capacity of Gas-Lubricated Parallel Slider Bearings.

- Tribology Letters* [online]. 2012, **48**(3), 315-327 [cit. 2016-09-11]. DOI: 10.1007/s11249-012-0027-4. ISSN 1023-8883.  
Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-012-0027-4>
- [23] AHMED, Arslan, H. H. MASJUKI, M. VARMAN, M. A. KALAM, M. HABIBULLAH a K. A. H. AL MAHMUD. An overview of geometrical parameters of surface texturing for piston/cylinder assembly and mechanical seals. *Meccanica* [online]. 2016, **51**(1), 9-23 [cit. 2016-08-25]. DOI: 10.1007/s11012-015-0180-6. ISSN 0025-6455.  
Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11012-015-0180-6>
- [24] VLĂDESCU, Sorin-Cristian, Simon MEDINA, Andrew V. OLVER, Ian G. PEGG a Tom REDDYHOFF. Lubricant film thickness and friction force measurements in a laser surface textured reciprocating line contact simulating the piston ring–liner pairing. *Tribology International* [online]. 2016, **98**, 317-329 [cit. 2016-08-26]. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.02.026. ISSN 0301679x.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X16001110>
- [25] BRITO, F.P., A.S. MIRANDA, J.C.P. CLARO, J.C. TEIXEIRA, L. COSTA a M. FILLON. The role of lubricant feeding conditions on the performance improvement and friction reduction of journal bearings. *Tribology International* [online]. 2014, **72**, 65-82 [cit. 2016-09-11]. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.11.016. ISSN 0301679x.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X13004015>
- [26] BOUYER, J. a M. FILLON. Experimental measurement of the friction torque on hydrodynamic plain journal bearings during start-up. *Tribology International* [online]. 2011, **44**(7-8), 772-781 [cit. 2016-09-11]. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.01.008. ISSN 0301679x.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X11000211>
- [27] LI, Kangmei, Zhenqiang YAO, Yongxiang HU a Weibin GU. Friction and wear performance of laser peen textured surface under starved lubrication. *Tribology International* [online]. 2014, **77**, 97-105 [cit. 2016-09-02]. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.04.017. ISSN 0301679x.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X14001492>
- [28] COSTA, H.L. a I.M. HUTCHINGS. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International* [online]. 2007, **40**(8), 1227-1238 [cit. 2016-09-11]. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.01.014. ISSN 0301679x.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X0700014X>
- [29] WANG, Hongtao, Yan LI a Hua ZHU. Experimental study on the tribological performance of fractal-like textured surface under mixed lubrication conditions. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2016, **307**, 220-226 [cit. 2017-01-24]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.08.071. ISSN 02578972.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897216308349>
- [30] RTEC INSTRUMENTS. Universal Tribometer [online]. Rtec Instruments: ©2013, [cit. 2016-09-11].  
Dostupné z: <http://www.rtec-instruments.com/universal-tribometer.htm>

- [31] BUEHLER. EcoMet-AutoMet Brochure [online]. Buehler: ©2016, [cit. 2016-09-11].  
Dostupné z: <https://www.buehler.com/Brochures/English/Grinding-Polishing/EcoMet-AutoMet-Brochure.pdf>
- [32] BRUKER. ContourGT-X 3D Optical Microscope [online]. Bruker: ©2015, [cit. 2016-09-11].  
Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surfaceanalysis/3d-industrial-optical-microscopy/contourgt-x/learn-more.html>
- [33] DOOR CORNELIS HENRICUS VENNER. *Multilevel solution of the EHL line and point contact problems proefschrift*. Enschede: C. Venner, 1991. ISBN 9789090039749.
- [34] ZENESE SEGU, Dawit a Pyung HWANG. Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test. *Tribology International* [online]. 2015, 91, 111-117 [cit. 2017-04-06]. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.06.028. ISSN 0301679x.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X15002832>
- [35] MOURIER, L., D. MAZUYER, A.A. LUBRECHT a C. DONNET. Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts. *Tribology International* [online]. 2006, 39(12), 1745-1756 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.triboint.2006.02.037. ISSN 0301679x.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X06000442>
- [35] QIU, Y. a M.M. KHONSARI. Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless steel rings. *Tribology International* [online]. 2011, 44(5), 635-644 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.01.003. ISSN 0301679x.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X11000090>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9

$CCW$	[-]	směr proti otáčení hodinových ručiček
$CW$	[-]	směr otáčení hodinových ručiček
$E$	[Pa]	modul pružnosti
$E'$	[Pa]	redukovaný modul pružnosti
$F; F_n$	[N]	zatěžující síla
$F_t$	[N]	třecí síla
$G$	[-]	bezrozměrný parametr materiálu
$H$	[-]	bezrozměrná tloušťka mazacího filmu, $h/R_x$
$\hat{H}$	[-]	bezrozměrná tloušťka mazacího filmu, $W/U^2$
$\hat{H}_{IRmin}$	[-]	bezrozměrný parametr minimální tloušťky mazacího filmu při izoviskozně-hydrodynamickém mazání
$\tilde{H}_{cen}$	[-]	bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu dle Moese
$L$	[-]	Moesův bezrozměrný parametr materiálu
$M$	[-]	Moesův bezrozměrný parametr zatížení
$R_x; R_y$	[m]	poloměr křivosti v ose x/y
$S_p$	[%]	plošná hustota textury
$U$	[-]	bezrozměrný parametr rychlosti
$W$	[-]	bezrozměrný parametr zatížení
$a; b$	[m]	délka hlavní/vedlejší poloosy Hertzova kontaktu
$d$	[m]	průměr dentu
$f; CoF$	[-]	koeficient tření
$g_E$	[-]	bezrozměrný parametr elasticity
$g^V$	[-]	bezrozměrný parametr viskozity
$h$	[m]	tloušťka mazacího filmu
$h1; h2$	[m]	výška dentu
$h_{v1}; h_{v2}$	[m]	výška vytlačeného materiálu
$k$	[-]	parametr elipticity
$n; rot$	[rpm]	rychlost otáčení
$p$	[Pa]	tlak
$p_h$	[Pa]	Hertzův tlak
$r$	[-]	Moesův doplňkový bezrozměrný parametr
$s$	[-]	Moesův doplňkový bezrozměrný parametr
$t$	[-]	Moesův doplňkový bezrozměrný parametr
$u; v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	kluzná rychlost
$\Lambda$	[-]	parametr mazání
$\alpha$	[Pa <sup>-1</sup> ]	viskozitně-tlakový koeficient
$\alpha_r$	[-]	parametr geometrie třecích těles
$\eta_0$	[Pa·s]	dynamická viskozita
$\nu_1; \nu_2$	[-]	Poissonova konstanta třecího povrchu 1/2

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 2-1</b> Stribeckova křivka [3]	14
<b>Obr. 2-2</b> Konformní (vlevo) a nekonformní (vpravo) povrchy [4]	15
<b>Obr. 2-3</b> Mapa režimu mazání pro parametr elipticity $k = 1$ [8]	17
<b>Obr. 2-4</b> Příklady tvarů textur [11]	18
<b>Obr. 2-5</b> Průzkum teoretických studií [10]	19
<b>Obr. 2-6</b> Počet publikací na povrchové textury v minulých 50 letech	20
<b>Obr. 2-7</b> Schéma konfigurace kontaktu [12]	21
<b>Obr. 2-8</b> Průměrné hodnoty koeficientu tření při zatížení 31 N ( $\approx 1$ MPa) [12]	21
<b>Obr. 2-9</b> Důlky v kontaktu při rotaci disku s hustotou textury 17 % [20]	22
<b>Obr. 2-10</b> Profily texturovaných ploch [20]	23
<b>Obr. 2-11</b> $a$ – buňka textury, $b$ – rozložení tlaku v buňce textury s kavitací, $c$ – rozložení tlaku v buňce textury s vlivem setrvačných sil, $d$ – „stepped“ profil, $e$ – texturovaný profil, $f$ – rozložení tlaků [10]	24
<b>Obr. 2-12</b> Vliv hustoty struktury na koeficient tření s poměrem hloubky/průměru 0,1 a vliv h/d poměru při hustotě textury 25 % [22]	25
<b>Obr. 2-13</b> Účinek normálové síly na koeficient tření při rychlosti zatěžování 1,27 N/s [27]	26
<b>Obr. 4-1</b> Experimentální zařízení	30
<b>Obr. 4-2</b> Princip optické interferometrie	31
<b>Obr. 4-3</b> Schéma experimentálního zařízení: 1 – rameno tribometru, 2 – přípravek se vzorkem, 3 – vysokorychlostní kamera, 4 – skleněný disk, 5 – polohovatelné zrcátko	32
<b>Obr. 4-4</b> Přípravek	33
<b>Obr. 4-5</b> Drsnost leštěného vzorku měřená na optickém profilometru	34
<b>Obr. 4-6</b> Měřené rozměry důlku	35
<b>Obr. 4-7</b> Dent vytvořený Rockwell indentorem silou 200 N s odstraněným valem materiálu	36
<b>Obr. 4-8</b> Vzorky – hladký (vlevo), texturovaný – 17 $\mu\text{m}$ (uprostřed), texturovaný – 50 $\mu\text{m}$ (vpravo)	36
<b>Obr. 4-9</b> Průběh koeficientu tření v závislosti na čase	37
<b>Obr. 4-10</b> Interferogram texturovaného vzorku	38
<b>Obr. 5-1</b> Mapa režimů mazání hladkého vzorku	40
<b>Obr. 5-2</b> Porovnání koeficientů tření pro směry CW a CCW	40
<b>Obr. 5-3</b> Průběh koeficientu tření vzorku s texturou 17 při $u = 0,9$ rpm	41
<b>Obr. 5-4</b> Závislost koeficientu tření na kluzné rychlosti	42
<b>Obr. 5-5</b> Teoretická tloušťka mazacího filmu	43
<b>Obr. 5-6</b> Teoretická a experimentální tloušťka mazacího filmu pro hladký vzorek	44
<b>Obr. 5-7</b> Experimentální tloušťka mazacího filmu hladkého vzorku	44
<b>Obr. 5-8</b> Statický kontakt, a – textura 17, b – textura 50	45
<b>Obr. 5-9</b> Snímky jednotlivých vzorků při různých rychlostech otáčení	45
<b>Obr. 5-10</b> Experimentální tloušťka mazacího filmu jednotlivých typů vzorků	46
<b>Obr. 5-11</b> Rozsah kavitace	47
<b>Obr. 5-12</b> Závislost koeficientu tření na tloušťce mazacího filmu	48
<b>Obr. 5-13</b> Hladovění dentu v důsledku kavitace	48
<b>Obr. 5-14</b> Lokální zadržení maziva v dentu	49
<b>Obr. 6-1</b> Průměrný koeficient tření pro hladký a texturovaný vzorek	50

<b>Obr. 6-2</b> Postupné vyčerpávání dentu (Textura 50, 11 rpm)	53
<b>Obr. 6-3</b> Změna tloušťky filmu na buňkou textury po vyčerpání maziva	53

---

## 11 SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 1</b> Parametry oleje FVA3	33
<b>Tab. 2</b> Parametry důlkové geometrie	35
<b>Tab. 3</b> Průměrná hodnota koeficientu tření	41



**12 SEZNAM PŘÍLOH****12**

---

1. Publikace výsledků pro vědecký článek v anglickém jazyce

**Výkresová dokumentace**

	<i>Název výkresu</i>	<i>Druh Výkresu</i>	<i>Číslo výkresu</i>
2.	Držák vzorku	Výkres sestavy	1-M/KSI-3/00
3.	Držák	Výkres součásti	1-M/KSI-4/1
4.	Trubka	Výkres součásti	1-M/KSI-4/2
5.	Mezikus	Výkres součásti	1-M/KSI-4/3
6.	Deformační člen	Výkres součásti	1-M/KSI-4/4
7.	Hřídel	Výkres součásti	2-M/KSI-3/1
8.	Držák disku 1	Výkres součásti	2-M/KSI-4/2
9.	Držák disku 2	Výkres součásti	2-M/KSI-4/2